

**Abhängigkeit der optischen Aberrationen höherer Ordnung  
von Augenerkrankungen und vom besten korrigierten Visus  
anhand der Wellenfrontanalyse des menschlichen Auges**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät  
der Friedrich-Schiller-Universität**

von Renate Stein

geboren am 13.03.1977 in Mühlhausen/Thüringen

**Gutachter**

1. ....
2. ....
3. ....

**Tag der öffentlichen Verteidigung:**

## Verzeichnis der Abkürzungen

AMD	.....	altersbedingte Maculadegeneration
BCVA	.....	<i>best corrected visual acuity</i>
CCD	.....	<i>charge coupled device</i>
ICL	.....	implantierbare Kontaktlinse
IOL	.....	Intraokularlinse
KCE	.....	Keratoconjunctivitis epidemica
LA	.....	linkes Auge
LASIK	.....	<i>Laser in situ Keratomileusis</i>
LSF	.....	<i>line spread function</i>
MFL	.....	Multifokallinse
MTF	.....	<i>modulation transfer function</i> (Modulationstransferfunktion)
MW	.....	Mittelwert
OSA	.....	<i>Optical Society of America</i>
PRK	.....	photorefraktive Keratektomie
PSF	.....	<i>point spread function</i>
RA	.....	rechtes Auge
RMS	.....	<i>root mean square</i>
SLD	.....	<i>super luminescence diode</i>
SLM	.....	<i>spatial light modulator</i>
Stabw	.....	Standardabweichung
WASCA	.....	<i>Wavefront Aberration Supported Cornea Ablation</i>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1. Fragestellung .....	7
1.2. Physikalische und mathematische Grundlagen .....	8
1.2.1. Abbildungsfehler des optischen Apparates des menschlichen Auges	8
1.2.2. Möglichkeiten der Beurteilung der Qualität eines optischen Systems	10
1.2.3. Grundlagen der Wellenfrontanalyse .....	12
1.3. Verfahren und Anwendungen der Wellenfrontanalyse .....	20
1.3.1. Tscherning-Aberroskop .....	20
1.3.2. Kreuzzylinder-Aberroskop .....	23
1.3.3. Raytracing-Verfahren .....	25
1.3.4. Hartmann-Shack-Aberrometrie .....	28
1.3.5. Anwendungsgebiete der Wellenfrontanalyse .....	29
<b>2. Patienten und Methoden</b>	<b>32</b>
2.1. Patienten .....	32
2.2. Untersuchungen .....	33
2.2.1. WASCA Wavefront Analyzer .....	33
2.2.2. Subjektive Refraktion .....	36
2.2.3. Erhebung der Diagnosen .....	36
2.3. Methoden der statistischen Auswertung .....	37
2.3.1. Mann-Whitney-U-Test .....	37
2.3.2. Wilcoxon-Test für gepaarte Stichproben .....	37
<b>3. Ergebnisse</b>	<b>38</b>
3.1. Ergebnisse der subjektiven Refraktion .....	38
3.1.1. Anzahl der emmetropen, myopen und hyperopen Augen .....	38
3.1.2. Extreme Myopien, Hyperopien und Astigmatismen .....	39
3.1.3. Verteilung der Werte der subjektiven Refraktion .....	40
3.1.4. Bester korrigierter Visus in der subjektiven Refraktion .....	43
3.2. Diagnosen und Altersverteilung der Probanden und Patienten .....	45
3.2.1. Probanden .....	46
3.2.2. Patienten .....	47



3.2.2.1.	Patienten mit zwei gesunden Augen .....	47
3.2.2.2.	Patienten mit einem gesunden und einem erkrankten Auge .....	48
3.2.2.3.	Patienten mit zwei erkrankten Augen .....	49
3.2.3.	Zusammenfassung der Diagnosen .....	52
3.3.	Ergebnisse der Wellenfrontanalyse .....	53
3.3.1.	Nicht durchführbare Messungen .....	53
3.3.2.	Messung von Sphäre, Zylinder und Achse mittels WASCA .....	55
3.3.3.	Verteilung der Wellenfrontaberrationen in einer gesunden Popu- lation .....	56
3.3.4.	Intraindividuelle Unterschiede der Wellenfrontaberrationen .....	60
3.3.5.	Vergleiche der unterschiedlichen Krankheitsgruppen .....	62
3.3.5.1.	Erkrankungen der Linse, Pseudophakien.....	62
3.3.5.2.	Erkrankungen der Retina.....	65
3.3.5.3.	Erkrankungen der Hornhaut .....	68
3.3.5.4.	Glaukom .....	70
3.3.5.5.	Amblyopie .....	72
3.3.6.	Vergleiche der Zernike-Koeffizienten anhand der BCVA .....	74
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>76</b>
4.1.	Subjektive Refraktion.....	76
4.2.	Diagnosen und Altersverteilung der Probanden und Patienten.....	77
4.3.	Ergebnisse der Wellenfrontanalyse.....	78
4.3.1.	Nicht durchführbare Messungen .....	78
4.3.2.	Messung von Sphäre, Zylinder und Achse mittels WASCA .....	79
4.3.3.	Verteilung der Wellenfrontaberrationen in einer gesunden Popu- lation .....	79
4.3.3.1.	Zernike-Koeffizienten .....	79
4.3.3.2.	RMS-Werte .....	80
4.3.3.3.	Intraindividuelle Unterschiede der Wellenfrontaberra- tionen .....	82
4.3.4.	Vergleiche der unterschiedlichen Krankheitsgruppen .....	84
4.3.4.1.	Erkrankungen der Linse, Pseudophakien.....	84

4.3.4.2. Erkrankungen der Retina .....	85
4.3.4.3. Erkrankungen der Hornhaut .....	85
4.3.4.4. Glaukom .....	86
4.3.4.5. Amblyopie .....	86
4.3.5. Vergleiche der Zernike-Koeffizienten anhand der BCVA .....	87
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>89</b>
<b>6. Literatur</b>	<b>91</b>
<b>Danksagung</b>	<b>97</b>
<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>98</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>99</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>i</b>
A.1. Alter, Geschlecht, Diagnosen, Zuordnung zu Vergleichsgruppen und Ergebnisse der subjektiven Refraktion .....	i
A.2. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 3 mm .....	vii
A.3. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 4 mm .....	xi
A.4. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 5 mm .....	xiv
A.5. Patienten-IDs der Augen in den einzelnen Vergleichsgruppen.....	xvii
A.6. Patienten-IDs und BCVA der Augen in den Visusgruppen 1 und 2 .....	xviii

# 1. Einleitung

## 1.1. Fragestellung

Unsere Arbeit untersucht die Einflüsse der Wellenfrontaberrationen auf das menschliche Sehvermögen sowie deren potentielle Auswirkungen auf die refraktive Chirurgie. Zum besseren Verständnis beschäftigt sich die Arbeit daher zunächst mit den verschiedenen Methoden zur Messung der monochromatischen Wellenfrontaberrationen des menschlichen Auges und deren theoretischem und historischem Hintergrund. Des Weiteren werden die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten der Wellenfrontanalyse diskutiert und deren Grenzen aufgezeigt.

Mit Hilfe von Messungen an Probanden mit gesunden oder amblyopen Augen und an Patienten der Poliklinik der Augenklinik der Friedrich-Schiller-Universität wird herausgearbeitet, inwieweit bestimmte Augenerkrankungen die Wellenfrontaberrationen beeinflussen. Dabei stehen zwei konkrete Fragestellungen im Vordergrund:

1. Wie unterscheiden sich die Wellenfrontaberrationen klinisch auffälliger Augen von denen gesunder Augen?
2. Hinsichtlich welcher Aberrationen höherer Ordnung bestehen Unterschiede zwischen den einzelnen betrachteten Krankheitsbildern?

Die Frage, ob bestimmte Muster bei Wellenfrontaberrationen einen positiven oder negativen Vorhersagewert hinsichtlich dieser Krankheitsbilder haben können, soll ebenfalls angeschnitten werden, lässt sich aber im Rahmen dieser Arbeit nicht erschöpfend beantworten.

Anhand der klinisch unauffälligen Augen unserer Probanden und Patienten sollen drei weitere Fragen untersucht werden:

1. Wie sind die einzelnen Wellenfrontaberrationen in einer gesunden Population verteilt?
2. Wie unterscheiden sich rechtes und linkes Auge derselben Person hinsichtlich ihrer Aberrationen?
3. Gibt es signifikante Unterschiede bei den Aberrationen höherer Ordnung zwischen Augen mit unterschiedlichem bestem erreichbarem Visus?

Die letzte Frage lässt sich umformulieren in die Hypothese, dass es mit der gezielten Beeinflussung der Aberrationen durch wellenfrontgesteuerte refraktive Chirurgie möglich ist, den mit sphärozyklindrischen Gläsern maximal erreichbaren Visus zu verbessern.

## 1.2. Physikalische und mathematische Grundlagen

### 1.2.1. Abbildungsfehler des optischen Apparates des menschlichen Auges

Der optische Apparat des Auges besteht zum einen aus den brechenden Medien Hornhaut, Augenkammern, Linse und Glaskörper, zum anderen aus den Photorezeptoren der Netzhaut. Während letztere für die Verarbeitung der Lichtreize zu einem Sinnesindruck verantwortlich sind und auf diese Weise die Qualität der Objektabbildung beeinflussen, beschäftigt sich diese Arbeit in erster Linie mit den Grenzen, die dem Sehen durch die lichtbrechenden Anteile des Auges gesetzt sind.

Die Bildqualität wird durch Abbildungsfehler dieses Systems begrenzt (Applegate et al., 2001). Allgemein bekannte Bildfehler sind Myopie, Hyperopie und (regelmäßiger) Astigmatismus. Für die Wellenfrontanalyse und die refraktive Chirurgie von besonderem Interesse sind hingegen Aberrationen, welche nicht durch einfache sphärische oder zylindrische Gläser ausgeglichen werden können. Dabei unterscheidet man zwischen monochromatischen und chromatischen Aberrationen. Letztere entstehen durch die Abhängigkeit der Brechkraft des Auges von der Wellenlänge des Lichtes und sollen hier keine weitere Rolle spielen.

Monochromatische Aberrationen treten bereits bei Verwendung von einfarbigem Licht auf und führen zu einer Verformung des Bildes (Verzeichnung, Bildfeldwölbung) oder zur unscharfen Abbildung eines Objektes. Hierbei unterscheidet man wiederum sphärische Aberrationen, Astigmatismus, Koma und Aberrationen höherer Ordnung.

Die sphärische Aberration (auch Öffnungsfehler genannt) entsteht dadurch, dass in der Peripherie einer Sammellinse einfallende Strahlen stärker gebrochen werden als zentraler gelegene Lichtstrahlen (Helmholtz, 1867). Dies führt zur Abbildung eines Objektpunktes als Zerstreuungskreis unterschiedlicher Helligkeit (Reiner, 1982). Der Öffnungsfehler ist des Weiteren von der Öffnung der Linse abhängig – im menschlichen Auge also von der Pupillenweite.

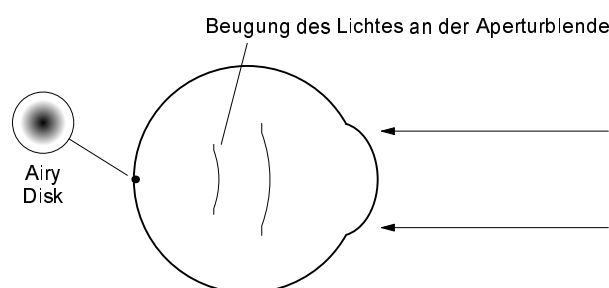
Bei einem astigmatischen Auge ist die Wirkung seines optischen Systems (bestehend aus Hornhaut, Kammerwasser und Linse) nicht in allen Meridianen gleich. Somit wirkt das Augensystem nicht – wie bei einem achsensymmetrischen Auge – wie eine sphärische Linse, sondern es bildet einen Objektpunkt als Brennlinie ab (Reiner, 1982). Hauptursache des Astigmatismus ist eine unterschiedliche Krümmung der Hornhaut

im waagerechten und senkrechten Meridian. Dieser Abbildungsfehler macht sich im Gegensatz zu anderen Aberrationen bereits bei engen Aperturblenden (d. h. bei enger Pupille) bemerkbar. Beim regelmäßigen Astigmatismus unterscheidet man den einfachen bzw. zusammengesetzten kurzsichtigen bzw. übersichtigen sowie den gemischten Astigmatismus. Diese Formen sind mit sphärozyklindrischen oder sphärotorischen Brillengläsern korrigierbar (Reiner, 1982). Nicht mit diesen Maßnahmen beeinflussbar sind allerdings irreguläre Astigmatismusformen.

Ein korrigiertes optisches System kann bei enger Aperturblende achsenferne Punkte scharf abbilden. Jedoch macht sich bei einer Erweiterung dieser Blende (bzw. einer Vergrößerung des Pupillendurchmessers) die von Tscherning „Koma“ genannte Aberration bemerkbar. Sie besitzt eine Ähnlichkeit zur sphärischen Aberration und wird ebenso wie diese dadurch verursacht, dass Strahlen verschiedener Einfallshöhen unterschiedlich stark abgelenkt werden. Allerdings geschieht dies im Gegensatz zum Öffnungsfehler auf eine asymmetrische Art und Weise, so dass die von Tscherning ausführlich beschriebene „Kometenform“ eines entfernten Objektpunktes resultiert (Tscherning, 1894).

### 1.2.2. Möglichkeiten der Beurteilung der Qualität eines optischen Systems

Den Idealfall einer abbildenden Optik stellt die so genannte beugungsbegrenzte (*diffraction limited*) Optik dar (Mrochen und Seiler, 2001). Dies bedeutet die Abwesenheit von oben genannten Abbildungsfehlern, schließt aber ein, dass eine Punktlichtquelle keinen scharfen Bildpunkt, sondern lediglich ein mehr oder weniger unscharfes Beugungsbild in der Fokusebene erzeugt (Abb. 1). Dieser Effekt wirkt sich um so stärker aus, je enger die Aperturblende des optischen Systems bzw. die Pupille des Auges ist.



**Abbildung 1:** Auswirkung der Beugung auf die Abbildung einer Punktlichtquelle durch das menschliche Auge (mod. nach Schwiergerling, 2000). *Airy Disk* (verschwommene Scheibe) bezeichnet das am Rand verwaschene Beugungsbild.

In den 60er Jahren wurden an der *University of Cambridge* Messungen zur Bestimmung der Abbildungsqualität des menschlichen Auges durchgeführt (Campbell and Green, 1965; Campbell and Gubisch, 1966). Diese kann durch interferometrische Methoden bestimmt und beispielsweise durch die *line spread function* (LSF) oder die *modulation transfer function* (Modulationsübertragungsfunktion) ausgedrückt werden. Die optische Qualität des Auges ist mit einer mäßig guten Linse vergleichbar (Gubisch, 1967). Bei ausreichend kleiner Pupille entsteht eine nahezu ideale Abbildung, deren Wahrnehmung aber durch neurale Faktoren der Retina limitiert wird. Die Kontrastsensivität des Auges nimmt mit steigendem Pupillendurchmesser deutlich ab.

Weitere etablierte Kenngrößen, mit denen die Qualität des optischen Systems des menschlichen Auges beurteilt werden kann, sind die *point spread function* (PSF), die Strehl-Zahl (*Strehl ratio*), die Wellenfrontvarianz und die kritische Pupillenweite.

Die Strehl-Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen dem Intensitätsmaximum einer durch eine mit optischen Aberrationen behaftete Optik abgebildeten Punktlichtquelle und der maximal erreichbaren Intensität dieser Lichtquelle bei Abbildung durch eine beugungsbegrenzte Optik. Im Idealfall beträgt die Strehl-Zahl 1; für die klinische

Praxis genügt es jedoch, eine Strehl-Zahl von mindestens 0,8 für eine aberrationsfreie Optik zu fordern (Gubisch, 1967).

Die Wellenfrontvarianz ist eine wichtige Kennzahl der Wellenfrontanalyse und für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung. Ihre Berechnung wird im nächsten Abschnitt besprochen. Aus dieser Varianz ergibt sich das Maréchal-Kriterium für eine beugungsbegrenzte Optik, welches besagt, dass für ein solches ideales abbildendes System die Wellenfrontvarianz kleiner als ein Vierzehntel der Wellenlänge des zur Messung benutzten Lichtes ist (Maréchal, 1947). Der kritische Pupillendurchmesser ist als der größte Durchmesser definiert, bei dem das menschliche Auge gerade noch das Maréchal-Kriterium erfüllt.

Die *point spread function* beschreibt, auf welche Weise eine Punktlichtquelle durch ein optisches System „verwischt“ wird. Diese „Verwischung“ (*spread*) kommt durch die Beugung des Lichtes und die Aberrationen des optischen Systems zustande. Die PSF wird als Lichtintensität über den verschiedenen Punkten der Bildebene dargestellt.

Analog zur PSF gibt die *line spread function* (LSF) die Lichtintensität an, die von einem linienförmigen Objekt in der Fokusebene erzeugt wird.

Die Modulationsübertragungsfunktion MTF (*modulation transfer function*) findet vor allem in der technischen Optik ihre Anwendung zur Charakterisierung der Kontrastübertragung eines optischen Systems. Ein Kontrast von 100 % bedeutet, dass die Intensität des Objektes von weiß bis schwarz variiert. Die MTF beschreibt den in der Bildebene noch auftretenden Kontrast (als Prozentsatz des Kontrastes des abgebildeten Objektes) in Abhängigkeit von der Anzahl der Linienpaare pro Millimeter bzw. der Ortsfrequenz des Objektes. Mit zunehmender Feinheit der Objektstruktur (also mit steigender räumlicher Frequenz) wird der Kontrast des Bildes immer schlechter. Die MTF hängt dabei im Wesentlichen von der Beugung des Lichtes, von den Aberrationen des abbildenden Systems und von der Aperturblende (also der Pupillengröße) ab.

Um zwischen zwei Linien differenzieren zu können, ist nicht immer der maximale Kontrast von  $K = 100\%$  erforderlich. Die *modulation threshold function* beschreibt, welchen Kontrast ein Objekt mindestens aufweisen muss, damit ein Sinusgitter mit einer bestimmten räumlichen Frequenz für das Auge erkennbar ist. Für mittlere Ortsfrequenzen genügt hier schon ein Kontrast von ca. 0,5 % (Schwiegerling, 2000).

### 1.2.3. Grundlagen der Wellenfrontanalyse

Um das Wesen des Lichtes und seine Eigenschaften zu erklären, sind im 17. Jahrhundert erstmals zwei voneinander unabhängige Theorien entwickelt worden. Die von Isaac Newton 1669 aufgestellte Emanations- oder Korpuskulartheorie beschreibt das Licht als eine Menge von Lichtkorpuskeln, die nicht der Gravitationskraft unterworfen sind und sich mit großer Geschwindigkeit auf geradlinigen Bahnen (Lichtstrahlen) bewegen.

Dem steht die nur acht Jahre später von Christian Huygens entwickelte Wellen- oder Undulationstheorie gegenüber, nach der das Licht ein Wellenvorgang, also eine in Raum und Zeit periodische Abfolge von Zuständen ist. Mit Hilfe dieser Theorie gelingt es auch, die Interferenz, Beugung und Polarisierung des Lichtes zu erklären, was mit der Korpuskulartheorie nicht möglich ist.

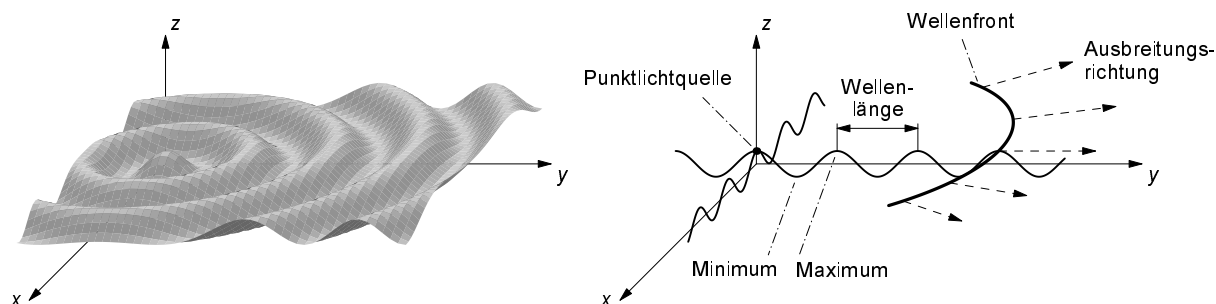
Heute geht man davon aus, dass das sichtbare Licht eine elektromagnetische Welle ähnlich wie Röntgen-, Wärme- oder ultraviolette Strahlung ist. Wie alle elektromagnetischen Wellen bewegt sich das Licht im luftleeren Raum mit der konstanten Geschwindigkeit von ca. 300.000 km/s. In unterschiedlichen lichtdurchlässigen Medien besitzt das Licht eine entsprechend kleinere Geschwindigkeit; dadurch ändert sich auch die Wellenlänge  $\lambda$ . Die Frequenz  $\nu$  bleibt konstant und bestimmt die Farbe des sichtbaren Lichtes.

Nach der Huygens'schen Wellentheorie bildet jeder Punkt einer Lichtquelle den Ausgang einer kugelförmigen Welle, die sich in einem homogenen Medium mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen ausbreitet. Gleiche Wellenphasen bzw. Schwingungszustände der Transversalwelle Licht können als konzentrische Kugelschalen dargestellt werden, wobei die äußerste Schale einer Kugelwelle als Wellenfront bezeichnet wird (Reiner, 1982).

Als Wellenfront bezeichnet man also eine Fläche, die aus Punkten besteht, die jeweils dieselbe optische Weglänge von einer Punktlichtquelle aus zurückgelegt hat. Diese Fläche ist in allen Punkten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes; alle Lichtstrahlen besitzen auf Höhe der Wellenfront die gleiche Phase (Mrochen und Seiler, 2001).

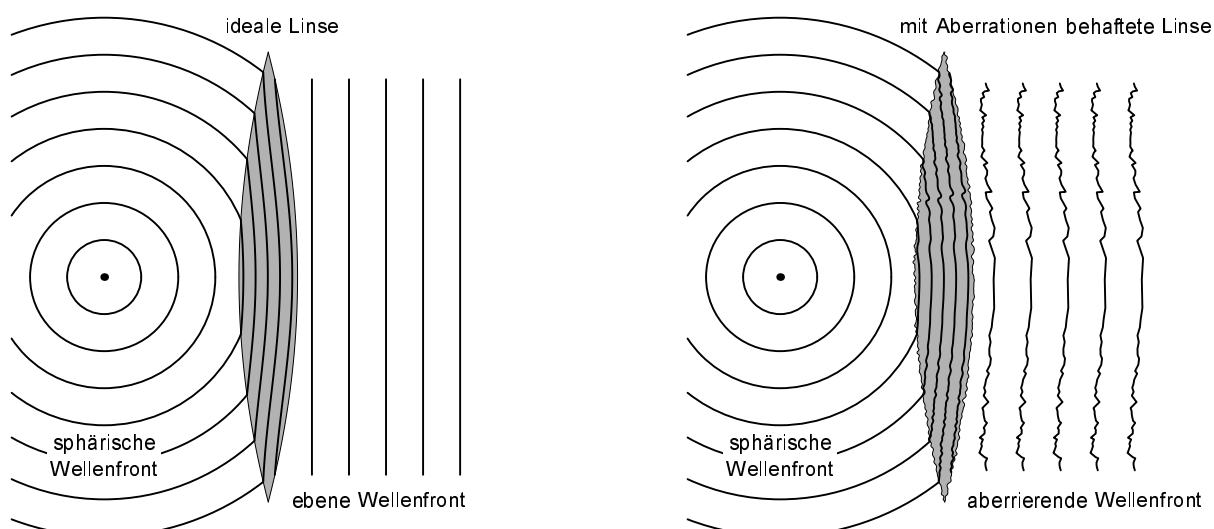


Abb. 2 stellt die Ausbreitung einer kugelförmigen Wellenfront vereinfacht dar. Ausgehend von einer Punktlichtquelle breitet sich das Licht mit seiner für das jeweilige Medium charakteristischen Wellenlänge und Geschwindigkeit aus. Dabei entsteht eine Wellenfront, auf deren Höhe alle Lichtstrahlen im gleichen Schwingungszustand sind (in der Abbildung auf dem Wellenmaximum).



**Abbildung 2:** Darstellung der Ausbreitung einer regelmäßigen Wellenfront ausgehend von einer Punktlichtquelle (mod. nach Asclepion Meditec, 2001). Das Licht breitet sich gleichmäßig in alle Richtungen des Raumes ( $x, y, z$ ) aus. Dabei steht die Wellenfront in jedem Punkt senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Die Transversalwelle Licht schwingt senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung und durchläuft dabei die für sie typischen Minima und Maxima. Die Wellenlänge  $\lambda$  hängt von der Farbe des Lichtes und damit auch von der Frequenz  $\nu$  ab.

Bei einem (hypothetischen) idealen Auge würde eine auf der Retina befindliche Punktlichtquelle bei ihrem Durchtritt durch die lichtbrechenden Medien so gebrochen werden, dass vor dem Auge eine plane Wellenfront entsteht (Abb. 3A). Alle Abweichungen von dieser idealen Wellenfront (Abb. 3B) werden als Wellenfrontaberrationen bezeichnet (Thibos, 2001).



**Abbildung 3:** Ausbreitung der Wellenfront ausgehend von einer Punktlichtquelle, **A:** durch eine „perfekte Linse“ – es entsteht eine ideale, plane Wellenfront – und **B:** durch ein mit Aberrationen behaftetes lichtbrechendes Medium (mod. nach Asclepion Meditec, 2001).

Der Wellenfrontfehler lässt sich als Entfernung der realen zu einer idealen Wellenfront für jeden Punkt  $(x, y)$  eines kartesischen Koordinatensystems darstellen. Dabei liegt der Ursprung dieses Koordinatensystems im Zentrum der Pupille auf der Pupillenebene;  $x$  gibt die horizontale,  $y$  die vertikale Richtung an. Die Ausbreitung der Wellenfront erfolgt entlang der  $z$ -Achse aus dem Auge heraus.

Ein Beispiel für einen solchen Wellenfrontfehler  $W(x, y)$  stellt der einfache Defokus, d. h. die reine Myopie bzw. Hyperopie dar. Für diesen Fall berechnet sich die Aberration wie folgt:

$$W(x, y) = 2(x^2 + y^2) - 1.$$

Üblicher ist die Verwendung eines polaren Koordinatensystems mit dem Radius  $\rho$  und dem Winkel  $\theta$ . So errechnet sich zum Beispiel ein Astigmatismus mit einer Achse von  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  nach folgender Formel:

$$W(x, y) = \rho^2 \cos(2\theta).$$

Um komplexe Wellenfronten wie beispielsweise atmosphärische Turbulenzen zu beschreiben, bedient man sich der Zernike-Polynome als Basiselemente (Noll, 1976). Der dänische Physik-Nobelpreisträger Frits Zernike (1888–1966) entwickelte dieses Funktionensystem zur mathematischen Beschreibung von Wellenfrontaberrationen in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts. Diese Polynome besitzen nicht nur direkten Bezug zu bekannten Abbildungsfehlern des Auges wie Astigmatismus und Koma, sondern zeichnen sich des Weiteren durch die Eigenschaften der Vollständigkeit und der Orthogonalität aus. Vollständigkeit bedeutet, dass sich jede beliebige Wellenfront als Linearkombination aus den Basiselementen darstellen lässt. So wie sich jeder beliebige Punkt im dreidimensionalen Raum als Summe aus den Vielfachen der drei Basisvektoren  $x$ ,  $y$  und  $z$  darstellen lässt, kann eine Wellenfrontaberration als Summe der Zernike-Polynome errechnet werden, wobei jedes Polynom mit einem Koeffizienten multipliziert wird, welchen man als Zernike-Koeffizienten bezeichnet. Da man keines der Basiselemente durch Superposition der anderen (mit Zernike-Koeffizienten gewichteten) Elemente darstellen kann, nennt man die Menge der Zernike-Polynome eindeutig bzw. orthogonal.

Die Polynome werden entsprechend der Konvention mit  $Z_n^f$  bezeichnet, wobei  $n$  der radialen Ordnung (d. h. der Potenz, mit der der Radius  $\rho$  in die Gleichung eingeht) und  $f$  der Winkelfrequenz (d. h. der Anzahl der Minima bzw. Maxima, die ein Punkt

beim Umkreisen der Ursprungskoordinaten auf dem Radius  $\rho$  durchläuft) entspricht.  $f$  erhält ein positives Vorzeichen, wenn der Term für das entsprechende Polynom eine Kosinusphase enthält; bei einer Sinusphase wird dementsprechend ein negatives Vorzeichen eingefügt. Die dazugehörigen Koeffizienten erhalten üblicherweise die Bezeichnung  $c_n^f$  und die Einheit  $\mu\text{m}$ , obwohl wir in unserer Arbeit auch die Koeffizienten mit  $Z_n^f$  bezeichnen.

Von Interesse für unsere Arbeit sind besonders die Zernike-Polynome der zweiten, dritten und vierten Ordnung. Die Polynome  $Z_0^0$ ,  $Z_1^{-1}$  und  $Z_1^1$  korrelieren mit konstanten Verschiebungen bzw. prismatischen Deviationen und haben somit keinen Einfluss auf die optische Qualität in monochromatischem Licht (Thibos, 2001). Zudem wird  $Z_0^0$  vom *Wavefront Analyzer* nicht gemessen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Berechnung der Zernike-Polynome sowie ihre Zuordnung zu Abbildungsfehlern optischer Systeme.

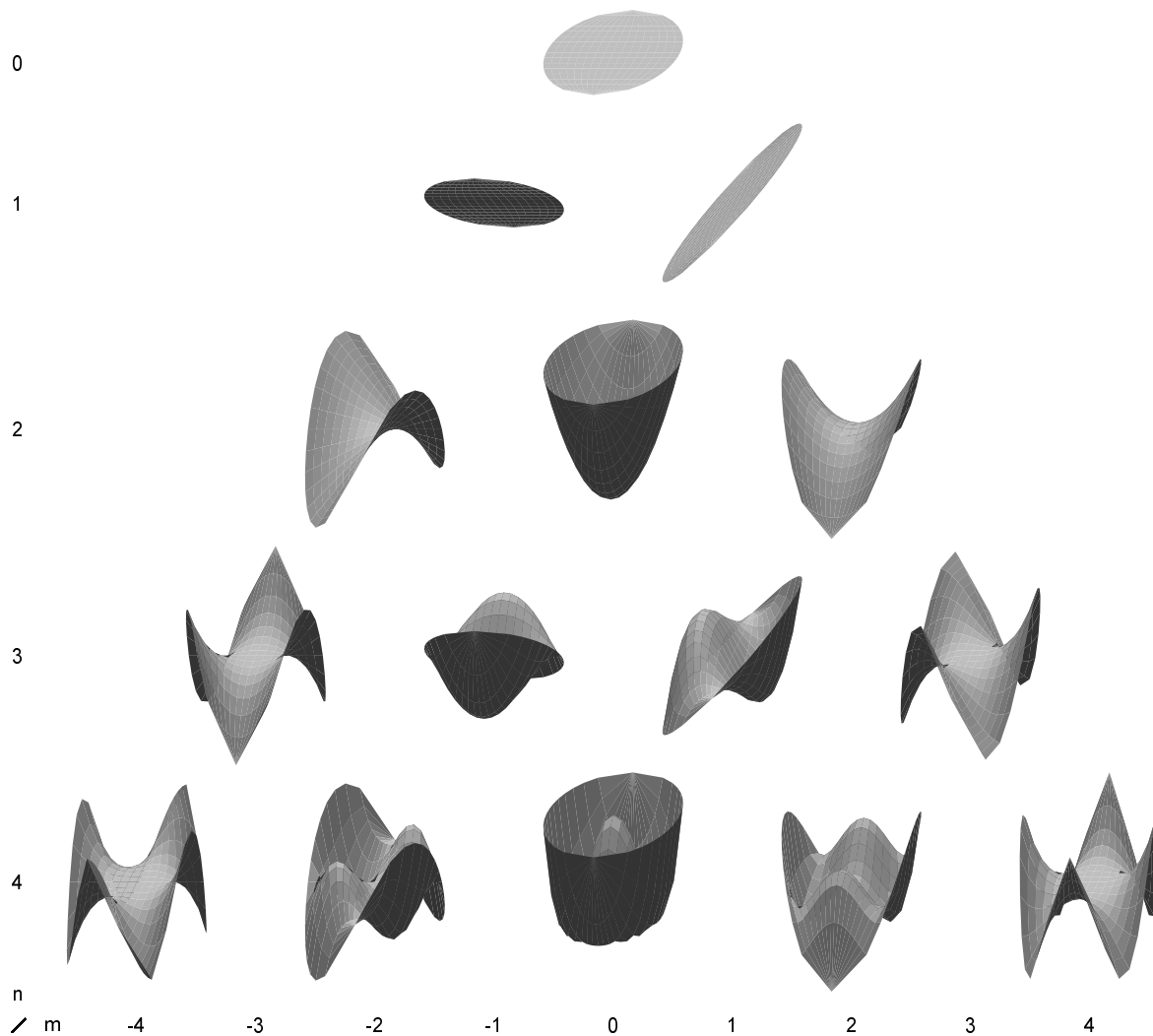
**Tabelle 1:** Errechnung und Beschreibung der Zernike-Polynome bis zur vierten Ordnung nach der Malacara-Notation (Malacara, 1992; Born and Wolf, 1999).

Zernike-Polynom	Polare Koordinaten	Kartesische Koordinaten	Beschreibung
$Z_0^0$	1	1	Konstante Verschiebung
$Z_1^{-1}$	$\rho \sin \theta$	$x$	Neigung entlang $y$ -Achse
$Z_1^1$	$\rho \cos \theta$	$y$	Neigung entlang $x$ -Achse
$Z_2^{-2}$	$\rho^2 \sin(2\theta)$	$2xy$	Astigmatismus bei Achse $45^\circ$ oder $135^\circ$
$Z_2^0$	$2\rho^2 - 1$	$-1 + 2x^2 + 2y^2$	Defokus (sphärischer Refraktionsfehler)
$Z_2^2$	$\rho^2 \cos(2\theta)$	$-x^2 + y^2$	Astigmatismus bei Achse $0^\circ$ oder $90^\circ$
$Z_3^{-3}$	$\rho^3 \sin(3\theta)$	$-x^3 + 3xy^2$	Dreizähliger Astigmatismus mit Basis auf der $x$ -Achse
$Z_3^{-1}$	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	$-2x + 3x^3 + 3xy^2$	Koma entlang der $x$ -Achse
$Z_3^1$	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	$-2y + 3x^2y + 3y^3$	Koma entlang der $y$ -Achse
$Z_3^3$	$\rho^3 \cos(3\theta)$	$-3x^2y + y^3$	Dreizähliger Astigmatismus mit Basis auf der $y$ -Achse
$Z_4^{-4}$	$\rho^4 \sin(4\theta)$	$-4x^3y + 4xy^3$	
$Z_4^{-2}$	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	$6xy + 8x^3y + 8xy^3$	
$Z_4^0$	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	$1 - 6x^2 - 6y^2 + 6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4$	Öffnungsfehler 3. Grades
$Z_4^2$	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	$3x^2 - 3y^2 - 4x^4 + 4y^4$	
$Z_4^4$	$\rho^4 \cos(4\theta)$	$x^4 - 6x^2y^2 + y^4$	

Eine reale Wellenfront  $W(\rho, \theta)$  kann also als gewichtete Summe der Zernike-Polynome nach folgender Formel dargestellt werden:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n,f} c_n^f Z_n^f .$$

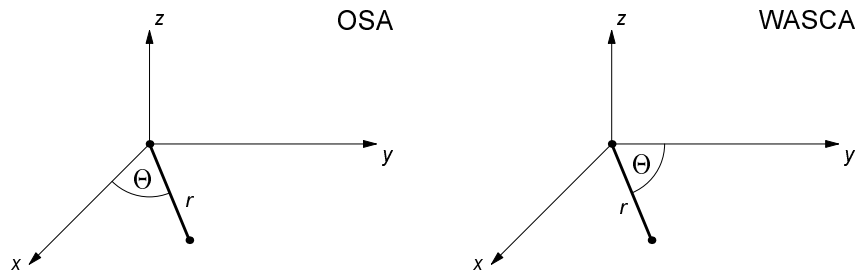
Je genauer man eine reale Wellenfront beschreiben will, desto mehr Zernike-Koeffizienten müssen in diese Formel einfließen. Mit dem *WASCA Wavefront Analyzer* führten wir Messungen bis zu Zernike-Polyomen der vierten Ordnung durch. Diese sind anschaulich in Abb. 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Wellenfrontaberrationen als dreidimensionale Darstellungen für die Zernike-Polynome der nullten bis vierten Ordnung (mod. nach Asclepion Meditec, 2001).

Die von der *Optical Society of America* (OSA) vorgeschlagene Terminologie bezeichnet einen Wellenfrontfehler als positiv, wenn die reale Wellenfront der idealen Wellenfront vorausseilt. Liegt die reale Wellenfront an dem entsprechenden Punkt hinter der idealen Wellenfront, so bekommt der dazugehörige Wellenfrontfehler ein negatives Vorzeichen (Thibos, 2001).

Der *Wavefront Analyzer* der Firma Zeiss-Meditec benutzt allerdings eine etwas andere Notation: hier werden die Wellenfrontfehler als *optical path difference* (OPD) dargestellt und besitzen demnach ein umgekehrtes Vorzeichen. Des Weiteren ist der Winkel  $\theta$  (oder auch mit dem Großbuchstaben  $\Theta$  bezeichnet) anders als in der OSA-Notation definiert (siehe Abb. 5).



**Abbildung 5:** Lage des polaren Koordinatensystems und Definition des Winkels  $\Theta$  nach der Notation der *Optical Society of America* (OSA) und der WASCA-Konvention (mod. nach Asclepion Meditec, 2001).

Die *VSIA Taskforce* aus führenden Experten auf dem Gebiet der Wellenfrontanalyse hat auf der jährlichen Tagung der OSA 2002 ihre Empfehlung für diese Notation bekräftigt (Thibos et al., 2002a). Danach wird die von WASCA genutzte Malacara-Nomenklatur nicht empfohlen. Inzwischen ist es möglich, mit dem *Wavefront Analyzer* die Zernike-Koeffizienten nach dieser Standard-Notation zu berechnen.

Oben genannte Unterschiede gilt es beim Vergleich unserer Ergebnisse mit denen anderer Autoren zu beachten. Außerdem wird bei der WASCA-Notation nicht die von der OSA vorgeschlagene *unit variance normalization* vorgenommen, welche die Vergleichbarkeit der relativen Größe der einzelnen Koeffizienten erleichtern soll (Thibos, 2001). Alle mit WASCA gemessenen Werte lassen sich allerdings leicht in die OSA-Form umrechnen.

So lässt sich zum Beispiel der Koeffizient  $Z_3^{-1}$  (WASCA-Konvention) aus dem OSA-Koeffizienten  $Z_3^1$  durch folgende Formel berechnen:

$$Z_3^{-1}(\text{WASCA}) = -\sqrt{8} \cdot Z_3^1(\text{WASCA}).$$

Tabelle 2 zeigt die Umrechnungsfaktoren der von uns benutzten Schreibweise für die Zernike-Koeffizienten der zweiten bis vierten Ordnung in die allgemein üblichere Darstellung der Wellenfrontaberrationen nach der *Optical Society of America*.

**Tabelle 2:** Umrechnung der Zernike-Koeffizienten aus der WASCA- in die OSA-Notation.

WASCA-Notation	OSA-Notation
$Z_2^{-2}$	$-\sqrt{6} \cdot Z_2^{-2}$
$Z_2^0$	$-\sqrt{3} \cdot Z_2^0$
$Z_2^2$	$\sqrt{6} \cdot Z_2^2$
$Z_3^{-3}$	$\sqrt{8} \cdot Z_3^3$
$Z_3^{-1}$	$-\sqrt{8} \cdot Z_3^1$
$Z_3^1$	$-\sqrt{8} \cdot Z_3^{-1}$
$Z_3^3$	$\sqrt{8} \cdot Z_3^{-3}$
$Z_4^{-4}$	$\sqrt{10} \cdot Z_4^{-4}$
$Z_4^{-2}$	$-\sqrt{10} \cdot Z_4^{-2}$
$Z_4^0$	$-\sqrt{5} \cdot Z_4^0$
$Z_4^2$	$\sqrt{10} \cdot Z_4^2$
$Z_4^4$	$-\sqrt{10} \cdot Z_4^4$

Die Wellenfrontvarianz bzw. deren Quadratwurzel – der RMS-Wert (*root mean square*) – stellen ein Maß für die Gesamtabweichung der gemessenen Wellenfront von der Referenz-Wellenfront dar. Die Wellenfrontvarianz  $\sigma^2$  kann innerhalb der OSA-Notation nach folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma^2 = \sum_{n,f} \left( c_n^f \right)^2.$$

Aufgrund der Unterschiede zwischen der Schreibweise der *Optical Society of America* und der WASCA-Notation ergibt sich für unsere Messungen folgende Formel zur Berechnung der Wellenfrontvarianz aus den Zernike-Koeffizienten:

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & \frac{1}{4} \left( (c_1^{-1})^2 + (c_1^1)^2 \right) + \frac{1}{6} \left( (c_2^{-2})^2 + 2(c_2^0)^2 + (c_2^2)^2 \right) \\ & + \frac{1}{8} \left( (c_3^{-3})^2 + (c_3^{-1})^2 + (c_3^1)^2 + (c_3^3)^2 \right) \\ & + \frac{1}{10} \left( (c_4^{-4})^2 + (c_4^{-2})^2 + 2(c_4^0)^2 + (c_4^2)^2 + (c_4^4)^2 \right). \end{aligned}$$

Würde man auch Zernike-Koeffizienten für Polynome höherer Ordnungen als der vierten bestimmen, müsste man diese Formel entsprechend erweitern.

Der RMS-Wert ist wie folgt definiert:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sigma^2}.$$

Er hat die Einheit  $\mu\text{m}$ .

Der mit unserer Messmethode erhaltene RMS-Wert entspricht dem der OSA-Notation und ist daher direkt mit den Ergebnissen anderer Autoren vergleichbar.

Wir benutzen in unserer Arbeit außerdem den RMS-Wert für Aberrationen höherer Ordnung, in welchen nur Zernike-Koeffizienten für Polynome dritter und vierter Ordnung einfließen und welcher sich wie folgt berechnen lässt:

$$(\text{RMS-HO})^2 = \sqrt{\frac{1}{8} \left( (c_3^{-3})^2 + (c_3^{-1})^2 + (c_3^1)^2 + (c_3^3)^2 \right) + \frac{1}{10} \left( (c_4^{-4})^2 + (c_4^{-2})^2 + 2(c_4^0)^2 + (c_4^2)^2 + (c_4^4)^2 \right)}.$$

Im Gegensatz zu den Aberrationen zweiter Ordnung (sphärischer Refraktionsfehler, regelmäßiger Astigmatismus) resultiert dieser Wellenfrontfehler aus Aberrationen, die nicht mit üblichen Brillengläsern korrigiert werden können (Liang et al., 1994).

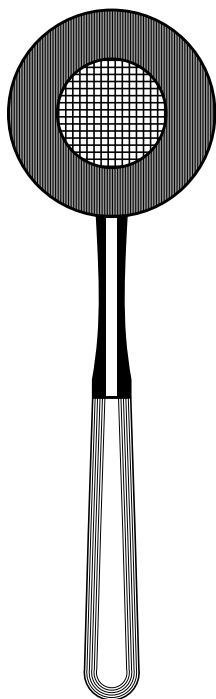
Mit Hilfe des RMS-Wertes können unterschiedliche Augen hinsichtlich ihrer Wellenfrontaberrationen verglichen werden, ohne dabei einzelne Zernike-Polynome besonders berücksichtigen zu müssen. Des Weiteren eignet sich die Wellenfrontvarianz zur Überprüfung des Maréchal-Kriteriums und somit zur Einschätzung der optischen Qualität des Auges.

### 1.3. Verfahren und Anwendungen der Wellenfrontanalyse

Heutzutage existieren eine Reihe verschiedener Methoden zur Messung der Wellenfrontaberrationen des menschlichen Auges (Howland, 2000). Jedes dieser Messverfahren hat seine eigenen Vor- und Nachteile. Die wichtigsten dieser Verfahren und ihre Weiterentwicklungen werden im Folgenden erläutert.

#### 1.3.1. Tscherning-Aberroskop

Die erste Arbeit über monochromatische Aberrationen des Auges und die erste subjektive Messmethode stammen von Tscherning (Tscherning, 1894). In seinem Artikel führt er den Begriff der „Aberrationen“ ein und bezeichnet damit all diejenigen Brechungsfehler des optischen Systems des menschlichen Auges, die weder auf Myopie, Hypermetropie noch auf einen regelmäßigen Astigmatismus zurückzuführen sind. Sein „Aberroskop“ zur Messung dieser optischen Fehler (Abb. 6) besteht aus einer plankonvexen Linse von 4 Dioptrien, in deren plane Seite ein quadratisches Gitter eingraviert ist.



**Abbildung 6:** Aberroskop nach M. Tscherning (Tscherning, 1894)

Ein Auge, das durch diese Linse auf einen entfernten Lichtpunkt blickt, nimmt eine charakteristische Verzerrung des Gitters wahr. Tscherning unterscheidet bei diesen Verzerrungen zunächst die „sichelförmige“ (bzw. kissenförmige) von einer „tonnen-

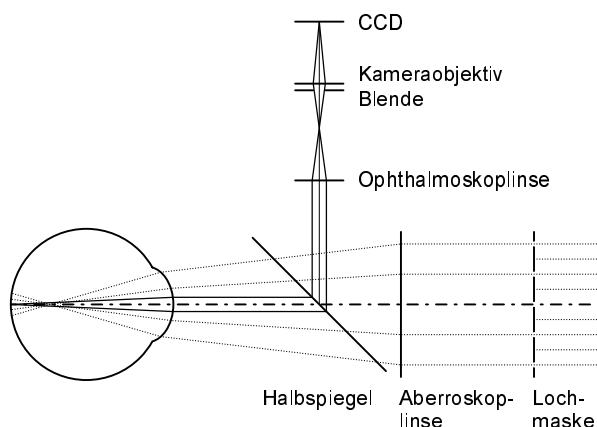


förmigen“ Deformation und führt beide auf die sphärische Aberration der Linse zurück, welche darin besteht, dass die Linsenperipherie eine andere Brechkraft als das Zentrum der Linse aufweist. Er beobachtet weiterhin, dass sich diese sphärische Aberration bei jungen Probanden während der Akkommodation ändert und dass sie bei Patienten nach Iridektomie bzw. mit Keratokonus eine wichtige Rolle bei der maximal erreichbaren Sehschärfe spielt.

Die nächste Beobachtung bezieht sich auf Augen, bei denen sich die Refraktion in einem Meridian zur Peripherie hin erhöht, während sie im dazu entgegengesetzten Meridian gleich bleibt (Astigmatismus).

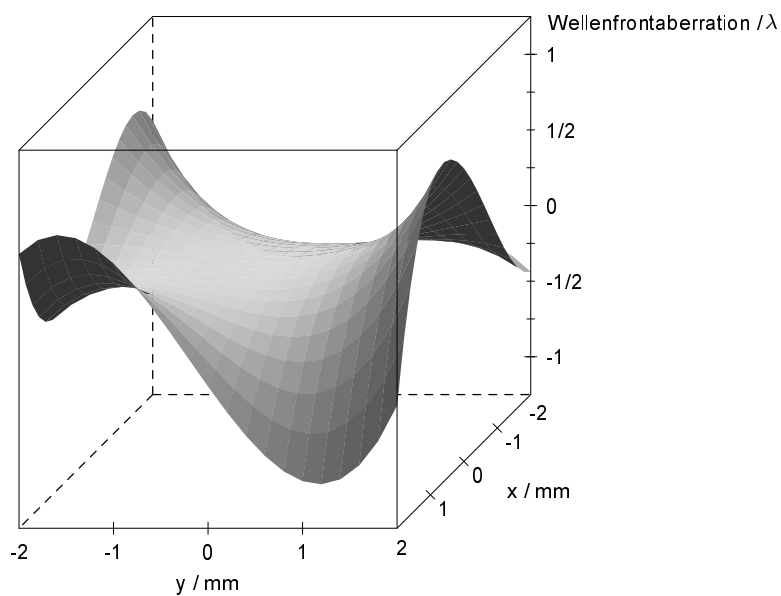
Schließlich beschreibt Tscherning anhand seines eigenen rechten Auges Brechungsfehler, die darin bestehen, dass die Refraktion in einem Meridian zur Peripherie hin abnimmt, während sie im dazu entgegengesetzten Meridian zunimmt. Diese Aberration entspricht dem „Koma“, da die beim Blick auf eine entfernte Lichtquelle entstehende Zerstreungsfigur die Form eines Kometen besitzt. Tscherning stellt einige theoretische Überlegungen zur Korrektur dieser verschiedenen Aberrationen an. Er schlägt vor, die sphärische Aberration mit Hilfe von Menisken bzw. mittels einer Kombination aus einer plankonvexen mit einer plankonkaven Linse zu korrigieren, und vermutet, dass sich damit ein iridektomiertes Auge bzw. ein Keratokonus ausgleichen lassen würde.

Basierend auf dem sogenannten Tscherning-Aberroskop entwickelten Mierdel et al. eine Methode, die mit Hilfe eines Lasersystems und einer CCD-Funduskamera die Wellenfront-Aberrationen objektiv messen kann (Mierdel et al., 1997; Mierdel et al., 2001) (Abb. 7).



**Abbildung 7:** Messprinzip zur Bestimmung der monochromatischen Aberrationen des Auges nach Mierdel et al. (Mierdel et al., 1997).

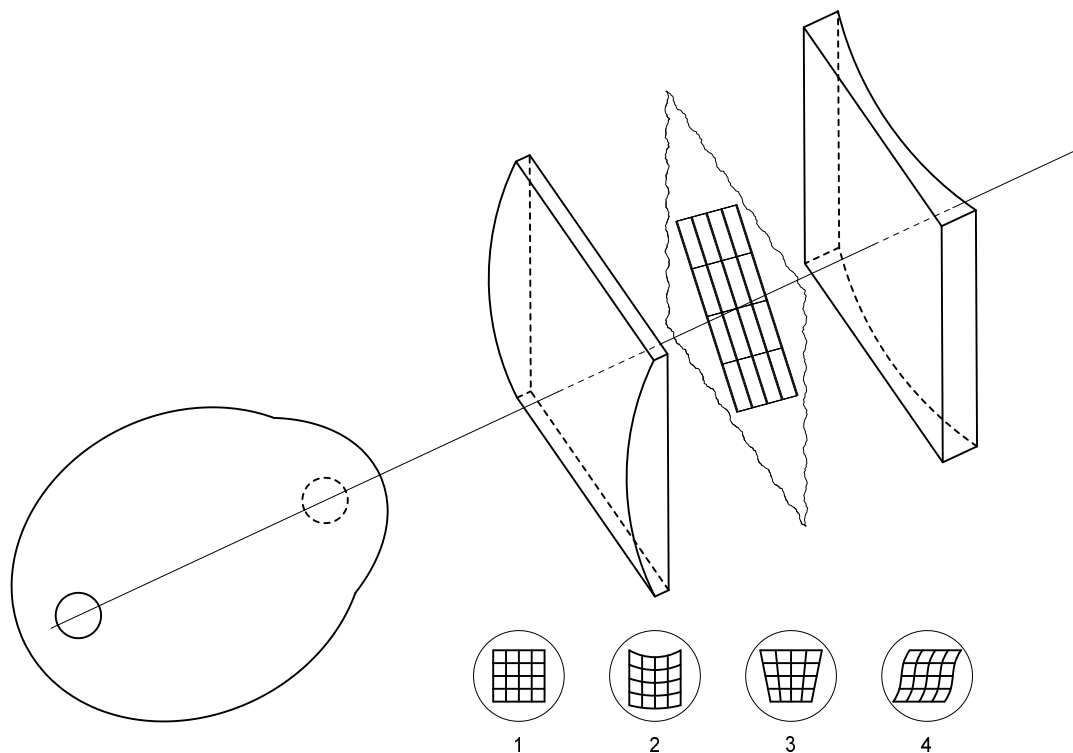
Das Messprinzip besteht darin, dass ein Parallelstrahlbündel durch eine Lochmaske in parallele Einzelstrahlen zerlegt wird, welche nach Durchlaufen einer Aberroskoplinsse von 4 Dioptrien in das Auge eintreten. Das entstehende retinale Lichtpunktmuster wird nach dem Prinzip der indirekten Ophthalmoskopie abgebildet. Die Abweichungen der Lichtpunkte vom idealen unverzerrten Lochpunktmuster werden mittels eines Computers analysiert und mit Hilfe der Zernike-Polynome quantifiziert. Ebenso kann die Wellenfrontaberration auch graphisch als „Wellenfrontaberrationsgebirge“ veranschaulicht werden (Abb. 8).



**Abbildung 8:** Darstellung der Wellenfrontaberration als Höhe über der Pupillenfläche. (Mierdel et al., 1997).

### 1.3.2. Kreuzzylinder-Aberroskop

Howland und Howland (Howland and Howland, 1976; Howland and Howland, 1977) führten bereits in den 70er Jahren das Kreuzzylinder-Aberroskop ein (Abb. 9), eine Weiterentwicklung ihrer subjektiven Messmethode zur Bestimmung der Aberrationen von Kameralinsen. Der Unterschied zum Tscherning-Aberroskop besteht darin, dass hier eine Kreuzzylinder-Linse von  $\pm 5$  Dioptrien anstelle der 4-Dioptrien-Linse Tschernings benutzt wird, um das Gitter auf die Retina zu projizieren. Das quadratische Gitter befindet sich dabei zwischen den beiden planen Linsenflächen.



**Abbildung 9:** Darstellung der Entstehung von verzerrten Gittern auf der Retina nach dem Prinzip des Kreuzzylinder-Aberroskops von Howland und Howland (mod. nach Howland and Howland, 1976). Vier verschiedene Muster sind dargestellt für ein Auge (1) ohne Aberrationen höherer Ordnung, (2) und (3) mit komaähnlichen Aberrationen und (4) mit Aberrationen 4. Ordnung.

Die Testpersonen mussten die von ihnen wahrgenommenen Gitter aufzeichnen, danach wurden mittels eines Computers die monochromatischen Aberrationen berechnet. Howland und Howland benutzen zur Beschreibung der Wellenfrontaberrationen die Taylor-Polynome. Deren Nachteil ist, dass sie nicht orthogonal sind und somit einander beeinflussen. Daher wurden sie in die schon erwähnten Zernike-Koeffizienten konvertiert, welche wie oben erwähnt den weiteren Vorteil besitzen, dass sie direkt mit

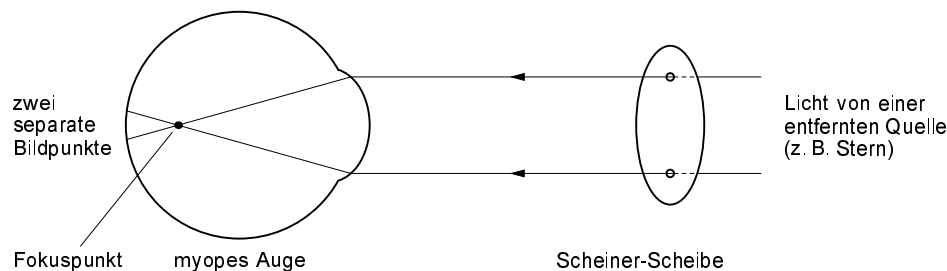
bekannten optischen Abbildungsfehlern korrelieren. Howland und Howland fanden bei der Untersuchung von 55 Augen heraus, dass die Aberrationen dritter Ordnung (komaähnliche Aberrationen) bei den gemessenen Wellenfrontaberrationen dominieren.

1984, fast hundert Jahre nach der Erfindung des Tscherning-Aberroskops, wurde von Walsh und Charman in Manchester eine erste objektive Methode zur Bestimmung der Aberrationen des menschlichen Auges entwickelt (Walsh and Charman, 1985; Walsh et al., 1984). Die Methode von Howland und Howland wurde so weiterentwickelt, dass das auf der Retina entstehende verzerrte Gitternetz fotografiert und mittels eines Computerprogramms ausgewertet werden konnte. Bei den ersten zehn Probanden ergaben die Messungen eine um die Sehachse unsymmetrische Wellenfront. Bis zu einem Pupillendurchmesser von ca. 2,5 mm war die Optik des Auges nahezu beugungsbegrenzt; darüber hinaus traten deutliche interindividuelle Unterschiede auf. Die Messungen an den Augen von weiteren elf Probanden bestätigten, dass die komaähnlichen Aberrationen eine herausragende Rolle für die Wellenfrontaberrationen bei allen Pupillendurchmessern spielen.

Jüngere Weiterentwicklungen des Kreuzzylinder-Aberroskops stammen aus Großbritannien (Walsh and Cox, 1995) und Spanien (Lopez-Gil and Howland, 1999). Bei ersterer Methode wird das auf der Retina entstehende Bild auf eine CCD-Videokamera projiziert und mittels Computer ausgewertet; die zweite Arbeitsgruppe verwendete sehr langwelliges („*near infrared*“)-Licht zur Akquirierung der Messdaten.

### 1.3.3. Raytracing-Verfahren

Zahlreiche weitere Verfahren nutzen zum einen das Prinzip der Scheiner-Scheibe (Scheiner, 1619) (Abb. 10), zum anderen das Raytracing als objektive Abwandlung des erstgenannten Prinzips. Der hauptsächliche Nachteil dieser Methoden besteht darin, dass das zu vermessende Auge während der langen Messdauer ausreichend fixiert sein muss (Charman, 1991).



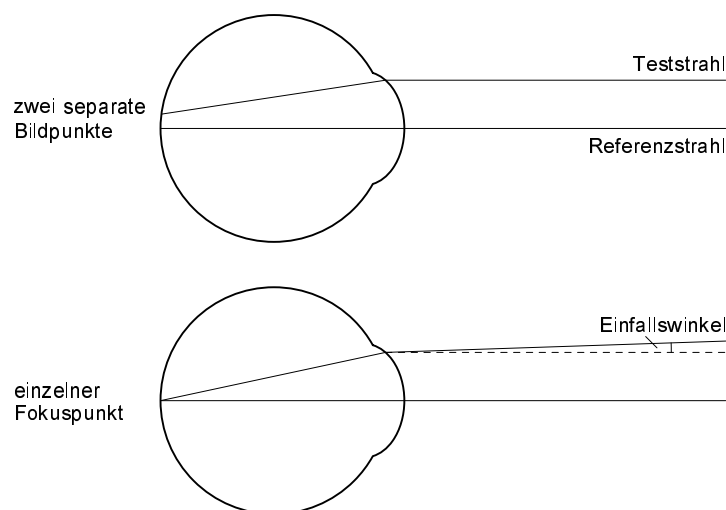
**Abbildung 10:** Refraktion mittels Scheiner-Scheibe (mod. nach Thibos, 2000). Blickt ein mit Refraktionsfehlern belastetes Auge durch die Scheiner-Scheibe einen Stern an, so bildet sein optisches System zwei separate Bilder dieses Objektes ab. Durch Vorschalten entsprechender Linsen können diese beiden Bilder zur Deckung gebracht und der Refraktionsfehler bestimmt werden.

Smirnov nutzt das Prinzip der Scheiner-Scheibe, um die optische Dicke einer hypothetischen „error plate“ für jeden Punkt der Pupille zu bestimmen (Smirnov, 1961). Dabei geht er davon aus, dass man das optische System des Auges als Superposition aus einem „idealen Auge“ ohne Aberrationen und einer vor dem Auge gelegenen fehlerbehafteten Platte (*error plate*) betrachten kann, welche Lichtstrahlen in unterschiedliche Richtungen ablenkt.

Bei diesem subjektiven Messverfahren werden nacheinander die Auslenkungen von dünnen Lichtstrahlen, die an verschiedenen Stellen der Pupille in das Auge einfallen, vermessen. Wichtige Erkenntnisse der Arbeit von Smirnov sind, dass es erhebliche interindividuelle Unterschiede bei den Wellenaberrationen gibt, dass die meisten Augen hinsichtlich ihrer Aberrationen nicht rotationssymmetrisch sind, und dass das Zentrum der Pupille mit einem Durchmesser von ca. 2 bis 2,5 mm bei vielen Augen nahezu aberrationsfrei ist. Wenn die letztgenannte Bedingung erfüllt ist, so kann auch ein Auge mit großen Aberrationen einen hohen Visus erreichen. Smirnov folgert, dass die Aberrationen wahrscheinlich erst bei niedrigem Kontrast oder sehr weiten Pupillen das Sehvermögen beeinträchtigen.

In den späten 60er Jahren bediente sich Schober an der Münchner Universität ebenfalls der Scheiner-Methode bzw. des „Koinzidenzverfahrens“, um die monochromatischen Aberrationen des menschlichen Auges zu messen (Schober et al., 1968; Schober et al., 1969). Hier wurden die Aberrationen bei verschiedenen Akkommodationslagen und Wellenlängen auf subjektive Weise gemessen.

Eine ähnliche Herangehensweise nutzen Webb et al. (Webb et al., 1992; Webb et al., 2003). Mit ihrem *spatially resolved refractometer* (örtlich auflösendes Refraktometer) vermaßen sie für 30 verschiedene Punkte der Pupille die Abweichung eines dort einfallenden Lichtstrahles von einem durch das Pupillenzentrum verlaufenden Referenzstrahl. Bei dieser „psychophysikalischen“ Methode müssen die Probanden die beiden Abbilder miteinander in Übereinstimmung bringen, indem sie den Einfallswinkel des Teststrahles ändern (Abb. 11).



**Abbildung 11:** Prinzip der Aberrationsmessung nach Webb et al. (mod. nach Webb, 1992). Es fallen nacheinander Teststrahlen durch verschiedene Punkte der Pupille in das Auge ein und erzeugen dort einen Bildpunkt. Durch die Veränderung des Einfallswinkels des Strahles muss der Proband diesen Bildpunkt in Deckung mit dem Abbild des Referenzstrahles bringen, welcher durch das Zentrum der Pupille verläuft.

He et al. entwickelten diese Methode weiter (He et al., 1998) und vermaßen mit jeweils ca. 1 mm dicken Teststrahlen 37 Testpositionen über einer Pupille von 5 mm Durchmesser. Die korrekte Ausrichtung des Auges während der Messung wurde mittels einer Kamera überwacht. Mit Hilfe von Zernike-Koeffizienten erfolgte die Auswertung der Ergebnisse für sechs Probanden, wobei eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, aber große interindividuelle Unterschiede hinsichtlich der Aberrationen fest-

gestellt wurden. Des Weiteren fanden sich signifikante Unterschiede zwischen Augen mit natürlicher Pupille und künstlicher Mydriasis bzw. akkommodierenden Augen.

He et al. stellten heraus, dass ihre Messung für Patienten geeignet ist, bei denen beispielsweise aufgrund von milden Trübungen der lichtbrechenden Medien keine objektiven Messungen durchgeführt werden können.

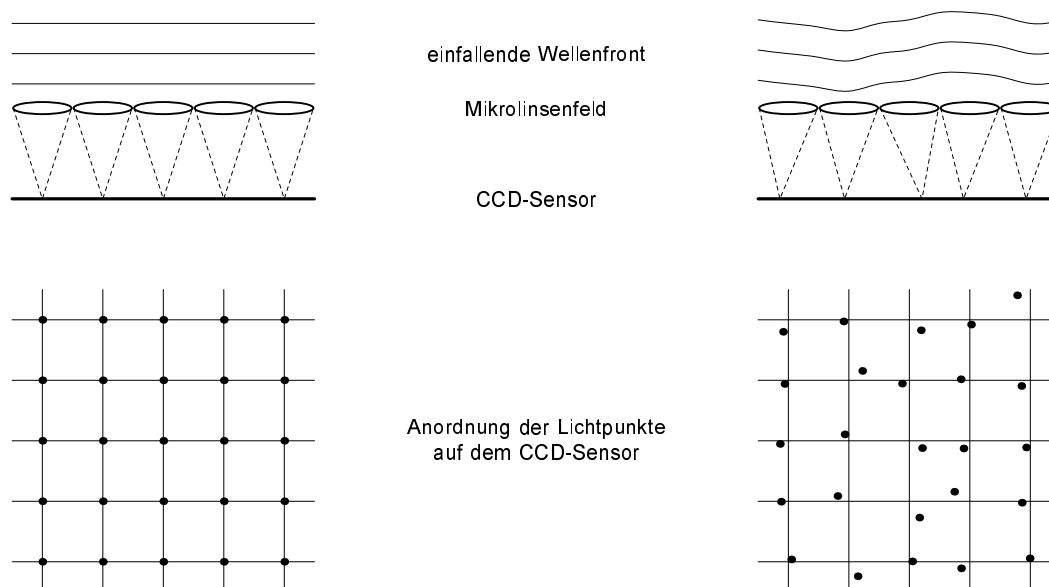
Das Prinzip des Raytracing besteht darin, die oben beschriebene Messmethode zu objektivieren sowie ihre Messdauer erheblich zu verkürzen (Molebny et al., 2000). Die von den Teststrahlen erzeugten Bildpunkte auf der Retina werden hier mittels einer Detektoranordnung nacheinander schnell erfasst und ihre Abweichung vom Referenzstrahl ausgewertet (Moreno-Barriuso et al., 2001a; He et al., 2000; Moreno-Barriuso and Navarro, 2000).

### 1.3.4. Hartmann-Shack-Aberrometrie

Eine moderne Entwicklung stellt der ursprünglich aus der astronomischen Anwendung stammende Hartmann-Shack-Sensor dar (Platt and Shack, 2001; Thibos, 2000; Liang et al., 1994).

Dieser bedient sich quasi ebenfalls des Prinzips der Scheiner-Scheibe (Applegate et al., 2001), jedoch erfolgt hier die Messung für jeden Punkt der Pupille simultan. Das Auflösungsvermögen des Sensors steht in direktem Zusammenhang mit der Größe der einzelnen Linsen im Mikrolinsenarray. Ihr Durchmesser entspricht der Dicke der einzelnen vermessenen Lichtstrahlen; ihre Anzahl innerhalb der Pupille der Zahl der Messpunkte.

Um 1900 entwickelte Hartmann ein Gerät zur Messung der Aberrationen von Spiegeln und Linsen (Hartmann, 1900). Hierzu verwendete er eine Scheibe mit mehreren Perforationen, mit deren Hilfe es möglich war, an vielen Punkten einer Wellenfront zugleich deren lokalen Anstieg zu messen. Shack und Platt ersetzten die Löcher in dieser Scheibe durch kleine Linsen (Shack and Platt, 1961). Mit Hilfe dieser Matrix aus winzigen Linsen wird die aus dem Auge austretende Wellenfront in vielen Brennpunkten gesammelt und das entstehende Muster mit dem Referenzmuster eines „idealen Auges“ verglichen (Abb. 12).



**Abbildung 12:** Messprinzip des Hartmann-Shack-Sensors (Platt and Shack, 2001). Die einzelnen Anteile der zu vermessenden Wellenfront werden durch das Linsenarray des Hartmann-Shack-Sensors aufgespalten und auf den Detektor fokussiert. Durch die unterschiedliche Steilheit in den einzelnen Bereichen der eintreffenden Wellenfront entstehen Abweichungen der Fokuspunkte von einer idealen Position. Mit Hilfe dieser Abweichungen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  werden die Zernike-Koeffizienten berechnet.



### 1.3.5. Anwendungsgebiete der Wellenfrontanalyse

Durch Kopplung der Analyse einer Wellenfront mit deren Ausgleich durch eine adaptive Optik ist es möglich, hochauflösende Funduskameras herzustellen und damit individuelle Photorezeptoren der Netzhaut sichtbar zu machen (Miller et al., 1996).

Verschiedene Autoren beschreiben eine solche Funduskamera, die mit Hilfe eines Hartmann-Shack-Sensors und eines verformbaren Spiegels höchste Auflösungen ermöglicht (Liang et al., 1997; Roorda, 2000; Fernandez et al., 2002; Bille, 2000). Andere verwenden an Stelle des verformbaren Spiegels Flüssigkristalle (SLM = *spatial light modulators*), mittels derer der Brechungsindex für verschiedene Stellen einer auftretenden Wellenfront lokal verändert werden kann (Thibos and Bradley, 1997).

Das Konzept der adaptiven Optik wurde zuerst von Babcock beschrieben und zur Verbesserung der Abbildung durch astronomische Teleskope genutzt (Babcock, 1953). Des gleichen Prinzips zur Verbesserung der Bildqualität bei der Aufnahme astronomischer Phänomene bedient sich das Hubble-Teleskop (Seiler et al., 2003). Ihre erste Anwendung in einem Ophthalmoskop fand die adaptive Optik 1989 durch Dreher et al. (Dreher et al., 1989).

Die potentiellen Nutzungsmöglichkeiten sind vielfältig (Maeda, 2001): pathologische Prozesse an der Retina können in einem frühen Stadium sichtbar gemacht werden (Liang et al., 1997), es können neue Erkenntnisse über die neurale Verarbeitung von Lichtimpulsen gewonnen werden (Roorda, 2000), und der Einfluss der Aberrationen höherer Ordnung auf das Sehvermögen kann direkt untersucht werden (Fernandez et al., 2002). Nicht zuletzt ist es möglich, durch die Aufhebung der Aberrationen höherer Ordnung den potentiellen Gewinn einer aberrationsreduzierenden refraktiven Chirurgie präoperativ zu simulieren (Bille, 2000).

Im Zuge der Verfeinerung der refraktiven Chirurgie des Auges sind einige der subjektiven und objektiven Messmethoden der Wellenfrontaberrationen so weiterentwickelt worden, dass sie direkt mit Ablationslasern verbunden werden können. Ziel ist es, die Qualität des Sehens nach einem solchen Eingriff zu verbessern (MacRae and Williams, 2001). Es wurde gezeigt, dass die konventionellen refraktivchirurgischen Verfahren (photorefraktive Keratektomie PRK und *Laser in situ Keratomileusis* LASIK) die Wellenfrontaberrationen erheblich vergrößern (Seiler et al., 2000; Mierdel et al., 1999; Moreno-Barriuso et al., 2001a). Dies führt zu einem Verlust der Kontrastsehschärfe und des Dämmerungssehens (Mrochen und Seiler, 2001). Dieser Verlust soll dadurch ver-

hindert werden, dass präoperativ eine Messung der Wellenfrontaberrationen erfolgt und aus diesen Werten das Abtragungsprofil für den Laser errechnet wird. Die entsprechenden technischen Bedingungen für die refraktive Hornhautchirurgie müssen allerdings erst noch geschaffen werden (Preußner, 2004). Alternativ zur Chirurgie der Hornhaut können andere Verfahren, wie zum Beispiel die Implantation von aberrationskorrigierenden Intraokularlinsen, zur Anwendung kommen (Pallikaris, 1998).

Theoretisch lässt sich mittels refraktiver Chirurgie ein Visus von 2,0 erreichen (Wesemann, 2004; Seiler et al., 2003). Jedoch kann sie weder chromatische Aberrationen ausgleichen, noch verhindern, dass sich die Aberrationen mit der Akkommodation oder im Laufe der Zeit verändern. Die am besten geeigneten Personen für eine solche Prozedur sind demnach Patienten mit starken Aberrationen, deren maximal erreichbarer Visus deshalb nur höchstens 1,0 beträgt, bzw. Menschen mit einem hohen Pupillendurchmesser (größer als 3 mm) auch unter photopischen Bedingungen.

Die erste wellenfrontgesteuerte LASIK wurde im Juni 1999 in Dresden durchgeführt (Mrochen et al., 2000). Drei Monate nach der wellenfrontgekoppelten LASIK bei 35 Augen konnte ein supernormales Sehvermögen (Visus 20/10 oder besser) bei fünf dieser Augen erreicht werden. Die Korrektur der Aberrationen höherer Ordnung blieb zunächst unbefriedigend (Mrochen et al., 2001).

Die ersten wellenfrontgeführten refraktiven Verfahren (PRK und LASIK) in den USA wurden im Oktober 1999 durchgeführt (McDonald, 2000). Beim Vergleich zwischen konventionellen und *CustomCornea*-Verfahren fanden sich bei den *CustomCornea*-Augen postoperativ niedrigere RMS-Werte der Aberrationen höherer Ordnung.

Auch für die Hornhauttopographie, insbesondere vor geplanter refraktiver Chirurgie, wird die Wellenfrontanalyse angewandt (Naseri et al., 2001). Der entscheidende Unterschied zu den klassischen Messverfahren Placido-Disk und *scanning slit topography* ist, dass es hierbei nicht möglich ist, den Ursprungsort der Aberration zuzuordnen, da neben der Hornhaut- auch die optische Aberration der übrigen lichtbrechenden Medien des Auges vermessen wird.

Neuere Forschungen zielen darauf ab, intraokulare Linsen zu entwickeln, mit deren Hilfe die Aberrationen höherer Ordnung ausgeglichen werden können. Die *Tecnis Z9000* (Pfizer, New York) ist die erste IOL dieser Art, die vor allem die corneale sphärische Aberration  $Z_4^0$  eliminieren und damit das Sehvermögen nach Katarakt-Operation verbessern soll (Packer et al., 2004; Altmann, 2004).

Mit dem von uns verwendeten Gerät *WASCA Wavefront Analyzer* der Firma Zeiss-Meditec und dem daran gekoppelten MEL-70 Excimer-Laser sind bereits wellenfrontgesteuerte Operationen durchgeführt worden (Panagopoulou and Pallikaris, 2001; Dausch et al., 2003). Dabei zeigte sich die PRK der LASIK hinsichtlich der Ergebnisse überlegen. Des Weiteren ist der *Wavefront Analyzer* in einer Studie zum Vergleich verschiedener Methoden zur Messung des Pupillendurchmessers zum Einsatz gekommen (Schmitz et al., 2003), wo ebenfalls gute Resultate erzielt wurden. Eine relativ neue klinische Anwendung des *WASCA Wavefront Analyzers* und einiger anderer Aberrometer ergibt sich aus der Möglichkeit, eine dynamische Aberration während der Akkommodation durchzuführen. Dies spielt z. B. bei der Beurteilung des Auges nach der Implantation potentiell akkommodativer Intraokularlinsen eine Rolle (Dick und Kaiser, 2002).

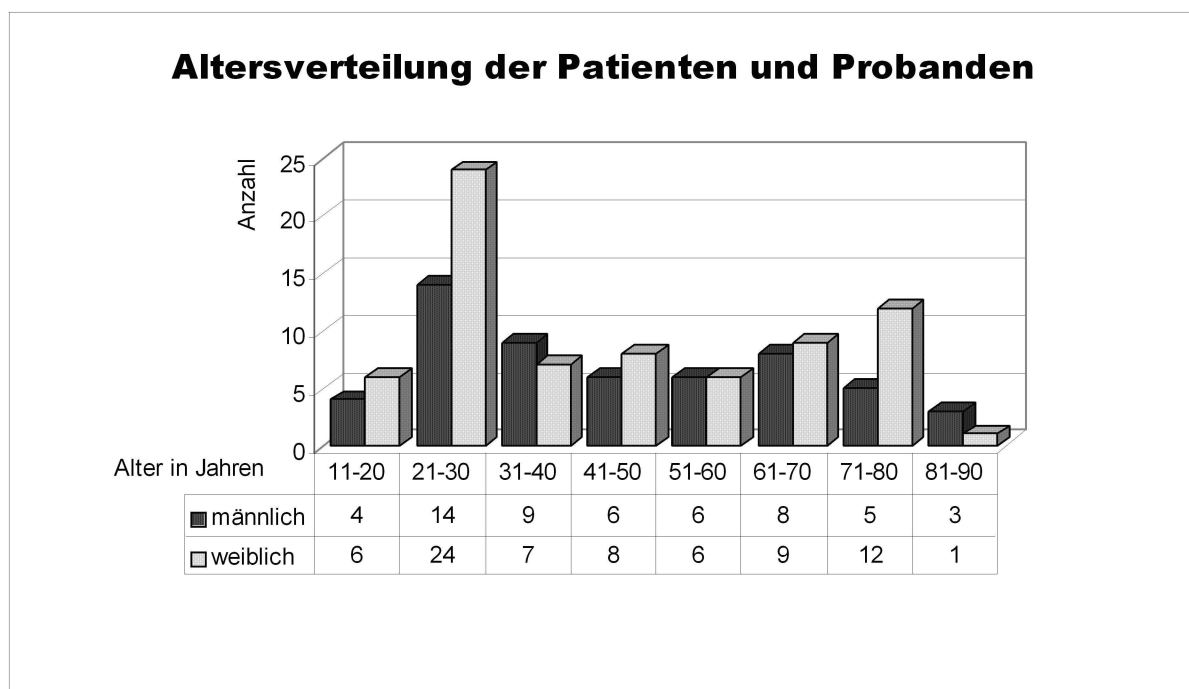
Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass es schon heute einige Routineanwendungen für die Wellenfrontanalyse gibt. Genannt seien hier die objektive Refraktion, die Messung von Aberrationen höherer Ordnung bei Patienten mit eingeschränktem skotopischem Visus, die Messung der Akkommodationsbreite und von Akkommodationsanomalien, die dynamische Aberrometrie und die Wellenfrontmessung zur Fertigung individuell angepasster Kontaktlinsen für verschiedene Patienten (Charman, 2004). Einschränkungen in der Anwendbarkeit bestehen z. B. dahingehend, dass eine Messung nur über der sichtbaren Pupillenweite stattfindet und sich deshalb in der Regel eine pharmakologische Pupillenerweiterung mit nicht vorhersagbaren Auswirkungen auf die Aberrationen notwendig macht. Des Weiteren müssen die mittels monochromatischen Infrarotlichtes gewonnenen Messdaten auf die Verhältnisse bei sichtbarem Licht extrapoliert werden. Und nicht zuletzt führen Veränderungen des Auges wie beispielsweise Katarakt oder vorangegangene refraktive Chirurgie zu unscharfen Messpunkten und damit verbundenen Schwierigkeiten in der Auswertung der Daten (Stevens und Sekundo, 2003).

## 2. Patienten und Methoden

### 2.1. Patienten

Für unsere Studie wurden an 93 Patienten der Augen-Poliklinik der Friedrich-Schiller-Universität Jena Messungen vorgenommen, ebenso an 35 Probanden, welche sich aus Medizinstudenten, Mitarbeitern des Klinikums sowie Mitarbeitern der Firma Asclepion Meditec zusammensetzten. Ausschlusskriterien waren das Tragen von Kontaktlinsen innerhalb 24 Stunden vor den Messungen sowie die medikamentöse Mydriasis. Bei einer Patientin bestand eine Ptosis eines Auges, daher wurde dieses nicht mit in die Studie aufgenommen. Zwei Patienten schieden aufgrund vorhandener Ausschlusskriterien und fehlender Daten aus der Studie aus.

Unter den Patienten und Probanden waren 55 (43 %) männlich und 73 (57 %) weiblich. Die Altersverteilung ist an nachfolgendem Diagramm (Abb. 13) ersichtlich; das Durchschnittsalter betrug bei den männlichen Patienten und Probanden  $46 \pm 20$  Jahre, bei den weiblichen  $44 \pm 21$  Jahre.



**Abbildung 13:** Alters- und Geschlechtsverteilung der Probanden und Patienten.

Nach einem Aufklärungsgespräch und der Einwilligung des Patienten wurde die routinemäßig übliche Bestimmung des Augeninnendruckes, des unkorrigierten photopischen Visus, der subjektiven Refraktion und des besten korrigierten Visus vorgenommen. Dies wurde gegebenenfalls durch die Autorefraktion sowie durch eine erweiterte Untersuchung ergänzt, welche im Folgenden beschrieben wird.

## 2.2. Untersuchungen

Folgende Daten wurden erhoben:

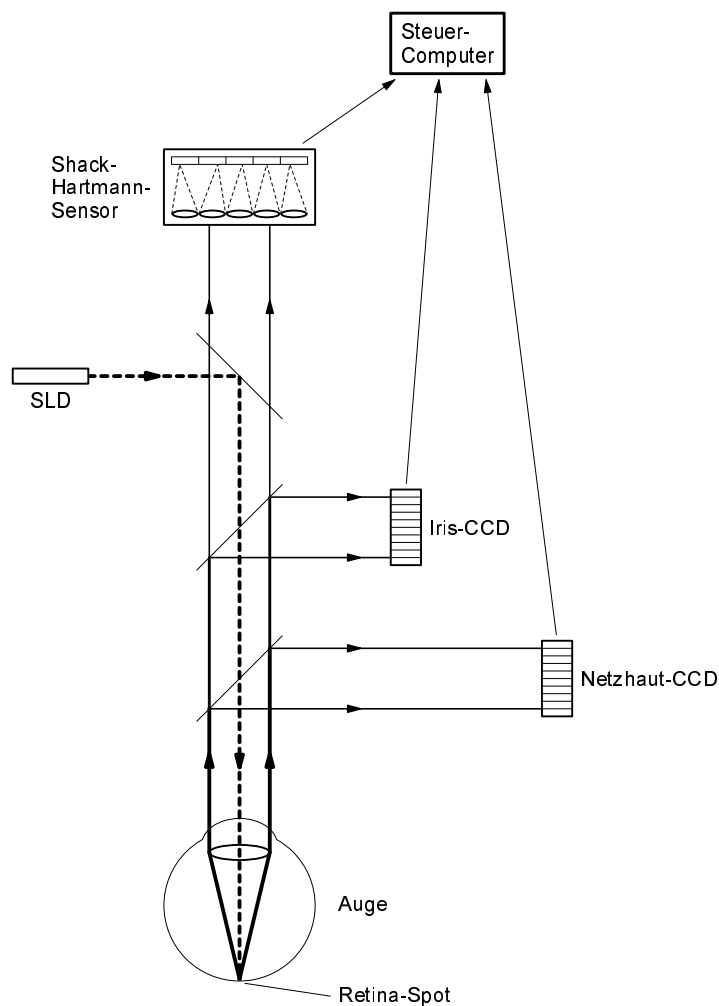
- *WASCA Wavefront Analyzer*: Sphäre, Zylinder, Achse und Aberrationen höherer Ordnung, RMS-Wert, aktueller Pupillendurchmesser
- Subjektive Refraktion mittels Messbrille und bester korrigierter Visus
- Augenerkrankungen und stattgehabte Operationen am Auge

### 2.2.1. WASCA Wavefront Analyzer

Das Aberrometer der Firma Asclepion Meditec (*Wavefront Aberration Supported Cornea Ablation WASCA*) führt Messungen der Wellenfrontaberrationen des Auges mittels eines Hartmann-Shack-Sensors durch. Ein schwacher, dünner Laserstrahl (Wellenlänge 830 nm) passiert das Zentrum der Pupille, wird von der Retina reflektiert, durchläuft danach sämtliche brechenden Medien des Auges und verlässt dieses schließlich in Form einer charakteristisch verformten Wellenfront.

Diese trifft auf den Hartmann-Shack-Sensor, welcher im Wesentlichen aus einer Anordnung von 1452 kleinen Sammellinsen besteht. Je nach der lokalen Ausrichtung der Wellenfront wird der durch eine Linse generierte Lichtpunkt von der Position, die bei einer idealen ebenen Wellenfront entstehen würde, ausgelenkt. Das entstehende Muster aus Lichtpunkten wird von einer CCD-Kamera empfangen und von einem Computer analysiert (Abb. 14).

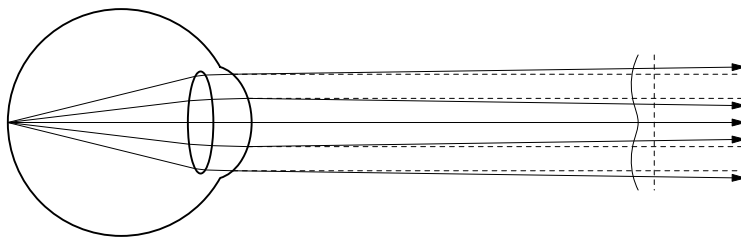
Zur Kontrolle der Messung dienen zwei Mechanismen: eine Iris-Kamera erlaubt es dem Untersucher, die Pupille zu zentrieren sowie eventuell auftretende Augenbewegungen während der Messung zu verfolgen. Mittels einer Netzhaut-CCD-Kamera ist es möglich, sich den auf der Retina erzeugten Lichtpunkt zu betrachten.



**Abbildung 14:** Schematische Darstellung des Messprinzips des *Wavefront Analyzers* (mod. nach Asclepion Meditec, 2001). Eine SLD erzeugt einen Messlichtstrahl (Wellenlänge 830 nm) und sendet diesen in das zu vermessende Auge, dessen korrekt zentrierte Position während des Messvorganges mit Hilfe einer Iris-Kamera überprüft werden kann. Durch die Bewegung eines Sliders wird der Retina-Spot minimiert und so zunächst der sphärische Refraktionsfehler des Auges ermittelt. Der Untersucher kann den auf der Netzhaut erzeugten Lichtfleck wiederum mittels einer CCD-Kamera kontrollieren. Im unmittelbaren Anschluss an die Refraktion erfolgt die Vermessung der aberrierenden Wellenfront durch den Hartmann-Shack-Sensor und die Verarbeitung der Daten im Computer.

Ein „perfektes“ Auge ohne Aberrationen würde eine ideale ebene Wellenfront und somit ein regelmäßiges Lichtpunktmuster auf dem Detektor erzeugen (s. auch Abb. 12, S. 28). Die Abweichungen von dieser theoretischen Anordnung werden in sphärische, zylindrische und Aberrationen höherer Ordnung, z. B. Koma, zerlegt. Mit Hilfe der Zernike-Koeffizienten können diese Aberrationen qualitativ und quantitativ erfasst werden.

Der *Wavefront Analyzer* bedient sich des umgekehrten ophthalmologischen Prinzips und arbeitet nach dem *single pass*-Konzept. Beim umgekehrten ophthalmologischen Prinzip (Abb. 15) wird der Strahlengang im Auge nicht vom Objekt zum Bild, sondern umgekehrt verfolgt. Bei der Messung mit WASCA wird zunächst ein eintretender Laser-Lichtstrahl auf die Retina fokussiert, wo er als Punktlichtquelle innerhalb des Auges fungiert. Von diesem Bildpunkt ausgehende Strahlen müssten bei einem idealen Auge außerhalb dessen genau parallel verlaufen. Anders ausgedrückt, müsste die das Auge verlassende Wellenfront im Idealfall plan sein. Abweichungen von diesem Idealfall werden erfasst und als Wellenfrontaberrationen gemessen. Im Gegensatz zur *double pass*-Technik passiert das Laserlicht die lichtbrechenden Medien des Auges bei der *single pass*-Technik nur einmal. Die Effekte, die vom Durchtritt des Laserstrahles durch Hornhaut, Linse und Glaskörper bewirkt werden und sich beim *double pass* der austretenden Wellenfront überlagern, sollen verhindert werden, indem der eintretende Laserstrahl sehr dünn ist und einen minimal kleinen Lichtpunkt auf der Retina erzeugt.



**Abbildung 15:** Umgekehrtes ophthalmologisches Prinzip und *single pass*-Konzept (mod. nach Asclepion Meditec, 2001).

Bei unseren Patienten und Probanden wurden pro Auge jeweils drei Messungen mit dem Aberrometer durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, mittels Abdunklung des Raumes eine Pupillenweite von möglichst mehr als 5 Millimetern zu erreichen. Die Messungen wurden ohne Sehhilfen wie Brille oder Kontaktlinsen in kurzem Abstand hintereinander ausgeführt. Die entsprechenden Rohdaten wurden zur späteren Auswertung gespeichert.

### **2.2.2. Subjektive Refraktion**

Von einer erfahrenen Augenoptikerin des Klinikums wurde bei allen Patienten und Probanden die Bestimmung der subjektiven Refraktion sowie des bestmöglichen mit Hilfe von sphärischen und torischen Gläsern erreichbaren Visus durchgeführt. Dazu wurden eine Messbrille, Probegläser, ein Kreuzzylinder und eine im Abstand von 6 Metern angebrachte Tafel zur Sehzeichenprojektion benutzt.

### **2.2.3. Erhebung der Diagnosen**

Aus den Krankenakten der Patienten sowie aus aktuellen Untersuchungsbefunden wurden folgende Daten erhoben: der Sehfehler (emmetrop, myop, hyperop), eventuelle Voroperationen des Auges (z. B. Intraokularlinse), Erkrankungen der Hornhaut (z. B. Keratokonus), der Retina (z. B. Maculadegeneration), Katarakt, Glaukom oder Amblyopie. Die Augen wurden dabei in Gruppen eingeteilt, wobei ein Auge mit mehreren Erkrankungen in alle entsprechenden Gruppen aufgenommen wurde.

Bei den Probanden wurden eine Spaltlampenuntersuchung, eine Fundoskopie sowie gegebenenfalls weitere Untersuchungen (z. B. Perimetrie) durchgeführt, um eventuelle Störungen zu erkennen.



## 2.3. Methoden der statistischen Auswertung

Mit dem Institut für Medizinische Statistik und Informatik wurde besprochen, welche statistischen Tests sich am besten zur Auswertung unserer Ergebnisse eignen. Die beiden unten genannten etablierten Tests wurden zur Bearbeitung unserer Fragestellungen ausgewählt. Die elektronische Datenauswertung und Erstellung der Diagramme erfolgte mit Hilfe der Statistikprogramme Excel 97 und SPSS 10.0.5.

### 2.3.1. Mann-Whitney-U-Test

Um zu testen, ob sich zwei unabhängige Stichproben in einem Merkmal voneinander unterscheiden, wird der Mann-Whitney-U-Test verwendet (Büning und Trenkler, 1994). Dieser setzt die Unabhängigkeit der Stichproben, jedoch nicht die Normalverteilung der Merkmale voraus, welche für die einzelnen Zernike-Koeffizienten bzw. deren Beträge in unseren Messungen nicht immer gegeben ist. Auch der RMS-Wert zeigt keine Normalverteilung, sondern ist linkssteil verteilt, während beispielsweise für  $Z_2^0$  bei gesunden Augen eine rechtssteile Verteilung besteht.

Wir verwendeten den Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der verschiedenen Krankheits- und Visusgruppen hinsichtlich der RMS-Werte und Zernike-Koeffizienten. Um die Unabhängigkeit der Stichproben zu gewähren, benutzten wir für diese Vergleiche nur jeweils ein Auge eines Patienten oder Probanden, auch wenn das andere Auge aufgrund seiner Eigenschaften in die gleiche Vergleichsgruppe passte. In diesem Fall wurde die Entscheidung darüber, welches der beiden Augen aufgenommen wird, per Zufall getroffen.

### 2.3.2. Wilcoxon-Test für gepaarte Stichproben

Um zwei Merkmale zu vergleichen, die an demselben Merkmalsträger beobachtet wurden, bedient man sich des Wilcoxon-Testes für verbundene Stichproben. Dieser wird anstelle des t-Testes dann eingesetzt, wenn eine Normalverteilung nicht angenommen werden kann (Büning und Trenkler, 1994).

Mit dem Wilcoxon-Test überprüften wir, ob intraindividuelle Unterschiede bei den RMS-Werten oder Zernike-Koeffizienten zu verzeichnen waren, ob es also Unterschiede zwischen dem rechten und linken Auge einer Versuchsperson hinsichtlich dieser Merkmale gab.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Ergebnisse der subjektiven Refraktion

##### 3.1.1. Anzahl der emmetropen, myopen und hyperopen Augen

Von den auswertbaren 126 Probanden und Patienten waren 29 auf beiden Augen emmetrop, d. h. die Summe aus der Sphäre in der subjektiven Refraktion und der Hälfte des Zylinders (sphärisches Äquivalent) betrug nicht mehr als 0,5 Dioptrien bzw. nicht weniger als  $-0,5$  Dioptrien. 41 Probanden bzw. Patienten waren beidäugig myop, 22 beidäugig hyperop.

Bei vier Patienten konnte die subjektive Refraktion nicht durchgeführt werden, da eine extreme Visuseinschränkung (Visus jeweils unter 0,1) beider Augen und/oder mangelnde Kooperativität bestand. Bei einem Patienten mit neu eingesetzten Multifokallinsen konnte die Akte mit den postoperativen Ergebnissen der subjektiven Refraktion nicht aufgefunden werden. Drei Probanden brachen ihre Teilnahme an der Studie ab, bevor die subjektive Refraktion durchgeführt werden konnte. Fünf Patienten waren auf einem Auge hyperop, während vom anderen Auge aufgrund extremer Visusminderung keine Daten erhoben werden konnten. Fünf Patienten waren auf einem Auge emmetrop, wobei vom jeweils zweiten Auge wiederum kein Ergebnis bekannt ist. Drei Patienten waren auf einem Auge emmetrop und auf dem anderen myop, sechs Patienten waren auf einem Auge hyperop und auf dem anderen emmetrop, vier weitere Patienten waren auf einem Auge myop und auf dem anderen hyperop. Von den drei Patienten, bei denen nur ein Auge untersucht wurde, war dieses in zwei Fällen myop und in einem Fall emmetrop (Tab. 3).

**Tabelle 3:** Sehfehler der Probanden und Patienten.

1. Auge	2. Auge	keine Daten	emmetrop	myop	hyperop
keine Daten		8			
emmetrop		6	29		
myop		2	3	41	
hyperop		5	6	4	22

Insgesamt wurde die subjektive Refraktion also für 73 emmetrope, 91 myope und 59 hyperope Augen durchgeführt.

### 3.1.2. Extreme Myopien, Hyperopien und Astigmatismen

Bei 20 Augen wurde eine starke Myopie (Sphäre unter  $-5$  Dioptrien) festgestellt; bei 18 Augen bestand ein starker Astigmatismus (Zylinder über 2 Dioptrien). Bei fünf dieser Augen war eine solche hohe Myopie mit einem starken Astigmatismus gekoppelt. Zwei aphake Augen waren fehlsichtig mit einem Sphärenwert von über 5 Dioptrien. Eines dieser beiden Augen hatte eine Sphäre von  $+10$  Dioptrien, das andere  $+9$  Dioptrien, verbunden mit einem Zylinder von 5,25 Dioptrien. Bei den restlichen 12 stark astigmatischen Augen war dieser Astigmatismus in 8 Fällen mit einer Myopie, in 4 Fällen mit einer Hyperopie verbunden. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht dieser Augen und eine Zuordnung zum BCVA sowie zu den relevanten Diagnosen.

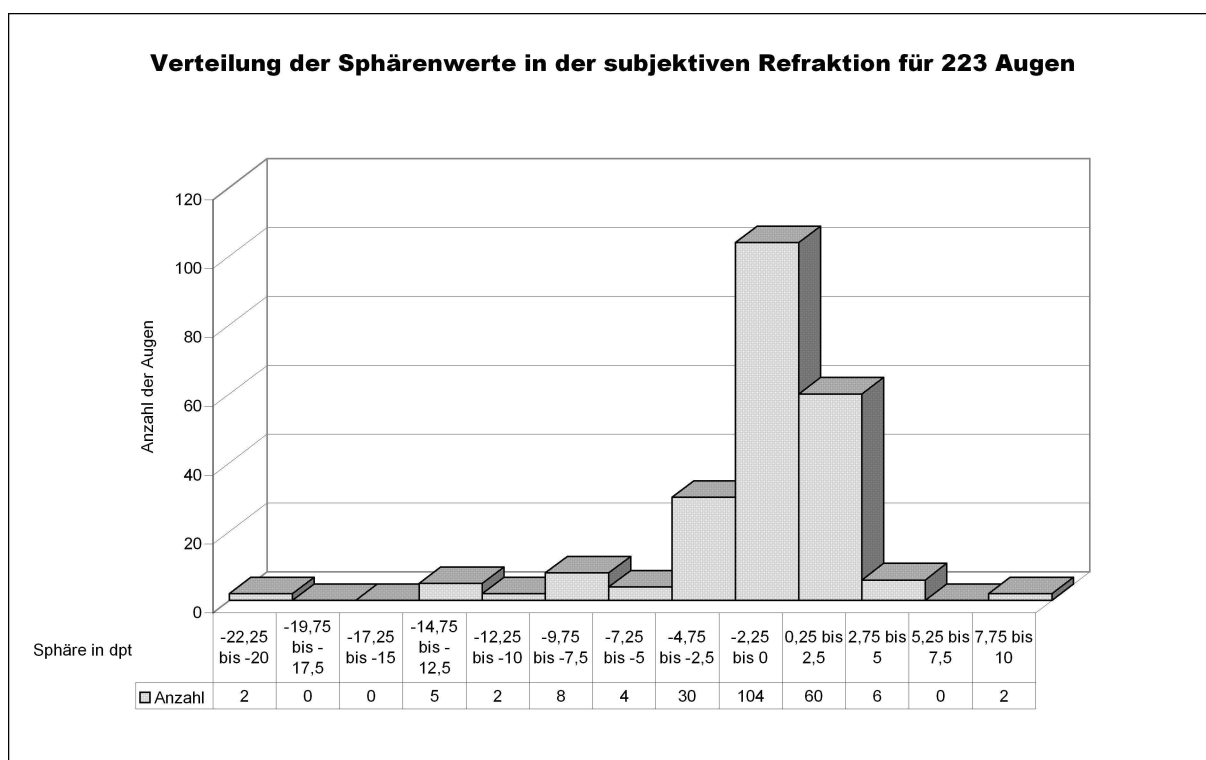
**Tabelle 4:** Sehfehler der Probanden und Patienten.

Geschl.	Alter	Auge	Sphäre	Zyl.	BCVA	relevante Diagnosen	
w	20	RA	−3,5	4	0,5	Amblyopie beidseits	
		LA	−3,25	3	0,5		
w	29	LA	−4,25	4,25	0,8	gesunde Patientin	
w	63	RA	−5,75	3	0,3	Keratoplastik	
w	33	RA	−10	6	0,7	keine relevanten Diagnosen	
		LA	−7,5	4,5	0,4		
w	73	RA	−11,75	2	0,4	Katarakt	beidseits unklare Hornhaut- veränderungen (KCE-Folge?)
		LA	−3,5	2,75	1	Pseudophakie	
m	34	RA	−9,25	0	0,9	gesunder Patient	
		LA	−9	0	1,25		
m	36	RA	−1	3,5	0,4	Keratokonius	
		LA	−2,5	2,5	0,5	Keratoplastik	
w	74	LA	10	0	0,4	Aphakie	
m	34	RA	−12,5	0,5	0,63	Keratokonius beidseits	
		LA	−13,5	0,5	0,4		
m	25	RA	−13	5	0,25	Keratokonius	
w	25	RA	−0,25	3	1	gesunde Patientin	
		LA	−0,75	3,5	0,8		
w	42	RA	−21	0	0,32	gesunde Patientin	
		LA	−20	0	0,32		
w	23	RA	−6	0,5	1,6	gesunde Probandin	
		LA	−5,5	0	1,25		
m	49	RA	4,25	10,5	0,2	beidseits Aphakie und Keratoplastik	
		LA	9	5,25	0,2		
m	15	LA	−7,5	1,75	0,63	Amblyopie	
m	33	RA	−13	1,5	0,5	Keratokonius beidseits	
		LA	−13	2,5	0,2		
m	72	RA	−4	3,75	1	Pseudophakie	
w	32	RA	−9	2	0,8	starke Einsprossung von Gefäßen in die Horn- haut durch Tragen weicher Kontaktlinsen	
		LA	−9	1,5	0,8		
w	24	RA	−7,5	0,25	1,25	gesunde Probandin	
		LA	−8,5	0	1,25		
m	29	RA	−2,5	2,75	1	gesund	
		LA	−4	5	0,02	Keratokonius	

BCVA = *best corrected visual acuity* (bester mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbarer Fernvisus); Alter in Jahren zum Zeitpunkt der Untersuchung; Angaben für Sphäre und Zylinder in Dioptrien.

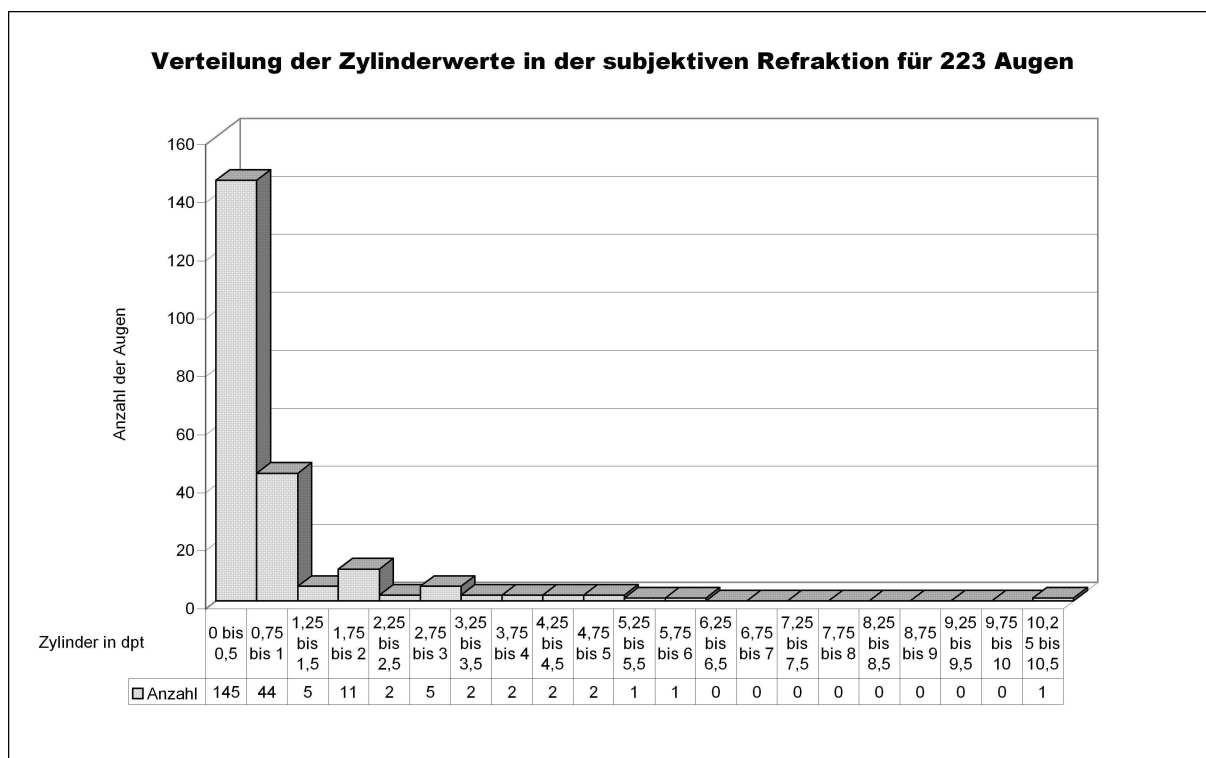
### 3.1.3. Verteilung der Werte der subjektiven Refraktion

Die Sphärenwerte in der subjektiven Refraktion reichten von  $-21$  bis  $+10$  Dioptrien. Die meisten Augen ( $n = 201$ , entspricht  $90\%$ ) wiesen eine sphärische Abweichung zwischen  $-5$  und  $+5$  Dioptrien auf. Bei  $167$  der  $223$  untersuchten Augen ( $75\%$ ) bestand ein Sphärenwert zwischen  $-2,5$  und  $+2,5$  Dioptrien (Abb. 16). Der Mittelwert der Sphären für  $223$  Augen war  $-1,3$  Dioptrien; die Standardabweichung betrug  $3,8$  Dioptrien.



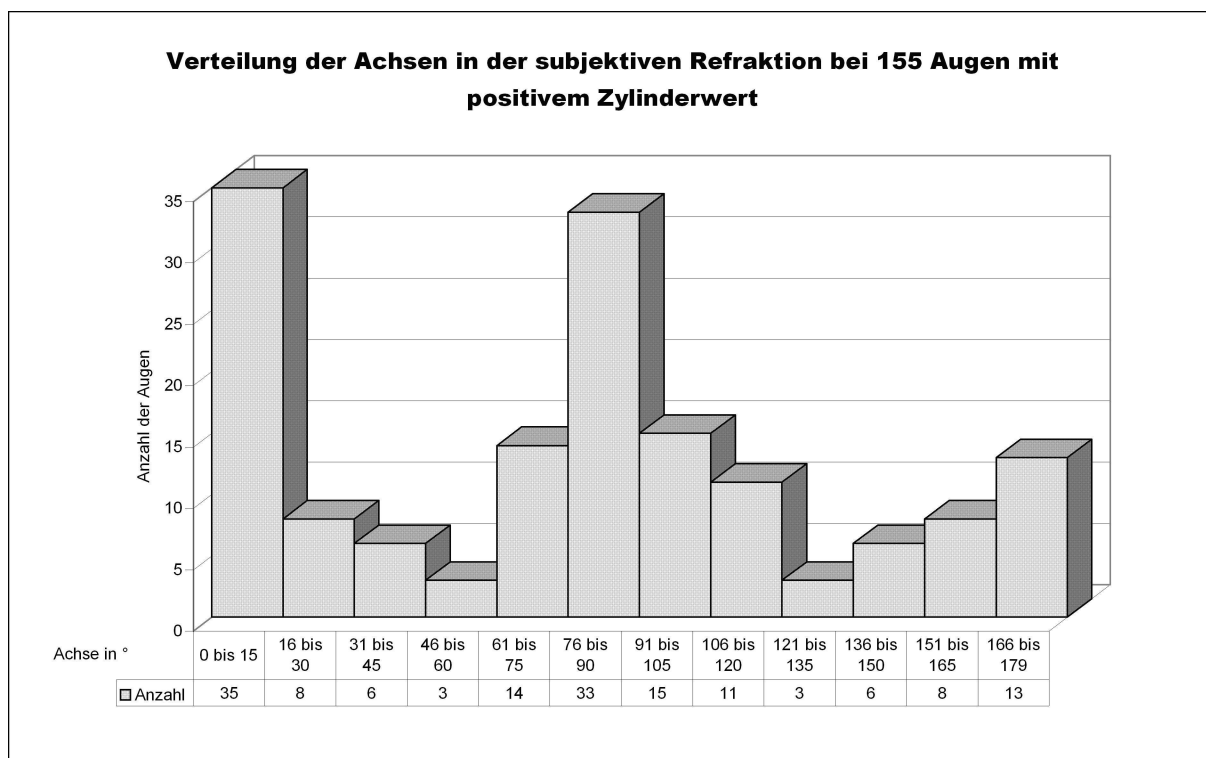
**Abbildung 16:** Sphärenwerte in der subjektiven Refraktion von 223 Augen (berechnet für positive Zylinderwerte).

Die Zylinderwerte rangierten von  $0$  bis  $10,5$  Dioptrien. Mit  $145$  Augen ( $65\%$ ) lagen die meisten Werte zwischen  $0$  und  $0,5$  Dioptrien (Abb. 17). Der Mittelwert der Zylinderwerte für  $223$  Augen betrug  $0,8$  Dioptrien; die Standardabweichung betrug  $1,2$  Dioptrien.



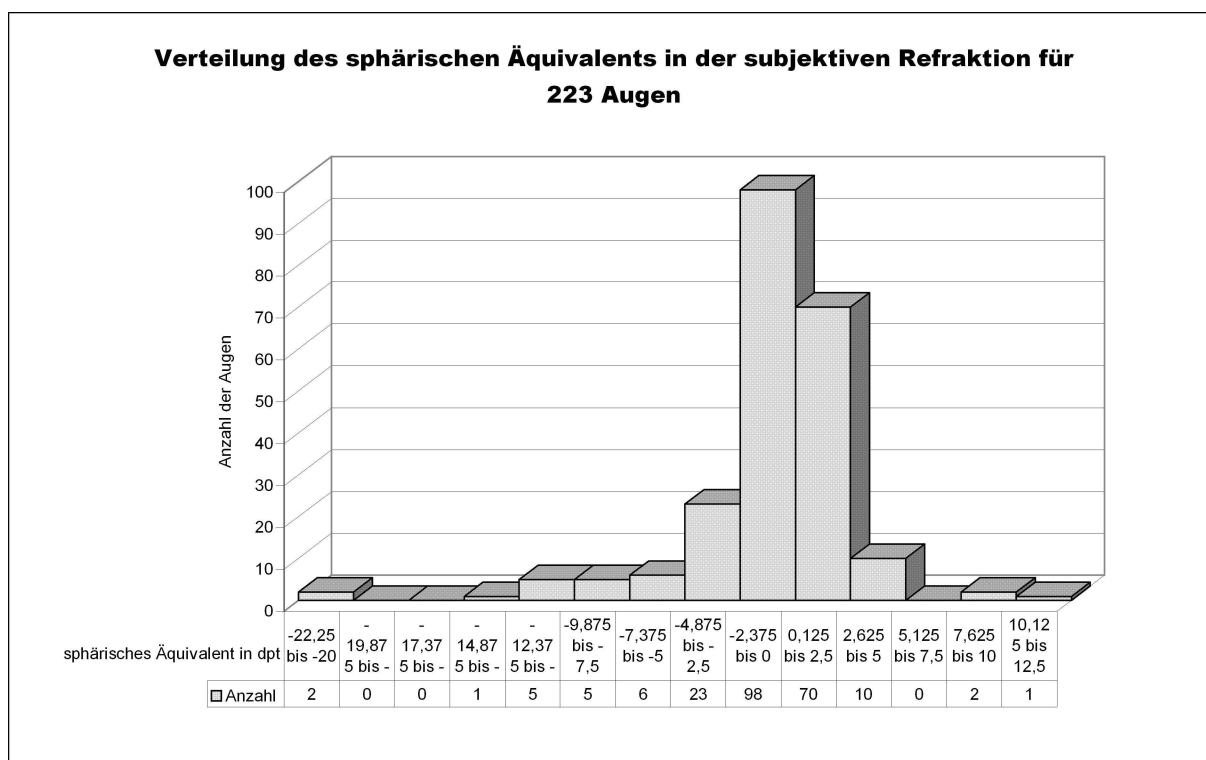
**Abbildung 17:** Zylinderwerte in der subjektiven Refraktion für 223 Augen.

Die Achsenlage in der subjektiven Refraktion wies zwei Maxima bei ca.  $0^\circ$  bzw. ca.  $90^\circ$  auf (Abb. 18).



**Abbildung 18:** Achsenlage in der subjektiven Refraktion für 155 Augen mit einem Zylinderwert verschieden von 0 Dioptrien (für positive Zylinderwerte).

Das sphärische Äquivalent wies eine ähnliche Verteilung auf wie die reinen Sphärenwerte. Die Spanne reichte hier von  $-21$  bis  $+11,625$  Dioptrien. Bei 73 Augen (33 %) lag das sphärische Äquivalent zwischen  $-0,5$  und  $+0,5$  Dioptrien (Abb. 19); dies entspricht unserer Definition einer Emmetropie. Im Mittel betrug das sphärische Äquivalent für alle Augen  $-1,0$  Dioptrien bei einer Standardabweichung von  $3,7$  Dioptrien. Für emmetrope Augen war der Wert  $0 \pm 0,3$  Dioptrien, für myope Augen  $-3,7 \pm 4,0$  Dioptrien und für hyperope Augen  $+2,2 \pm 2,1$  Dioptrien.



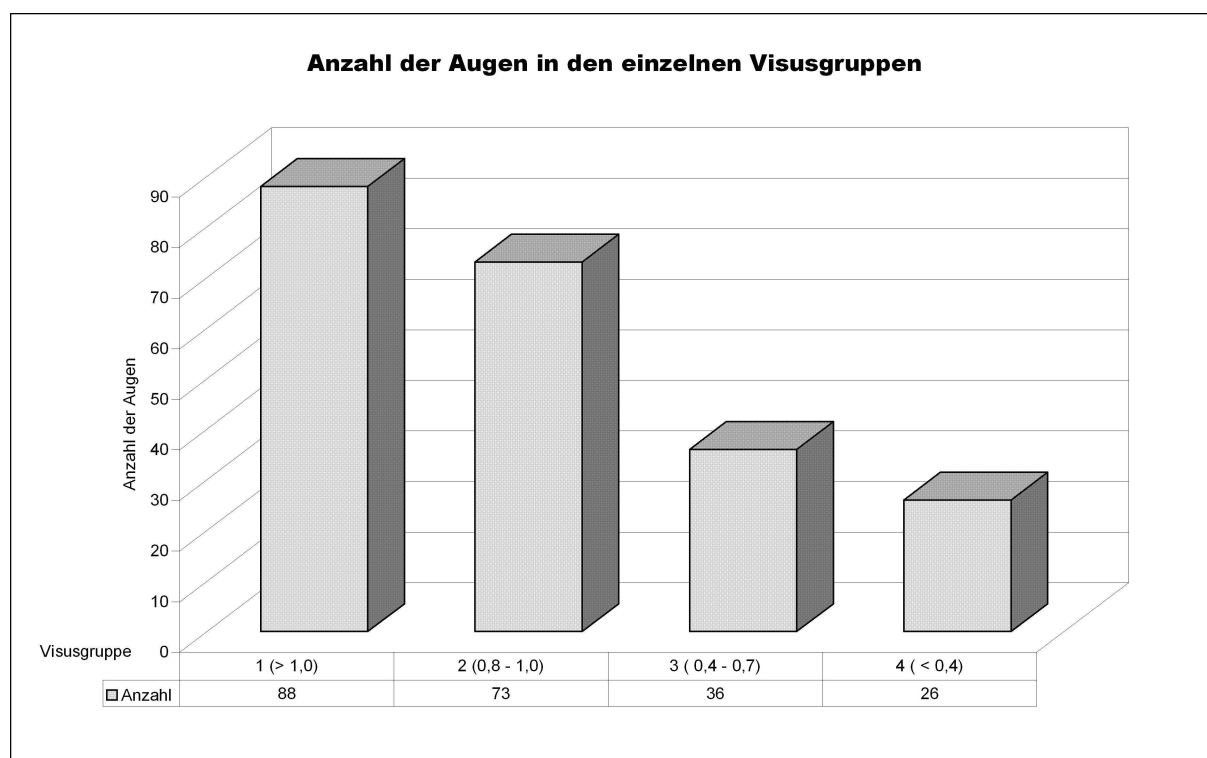
**Abbildung 19:** Sphärisches Äquivalent in der subjektiven Refraktion für 223 Augen. Das sphärische Äquivalent berechnet sich wie folgt:

sphär. Äquiv. (in dpt) = Sphäre (in dpt) +  $\frac{1}{2}$  Zylinder (in dpt).

### 3.1.4. Bester korrigierter Visus in der subjektiven Refraktion

Bei den 223 Augen, für die die Ergebnisse der subjektiven Refraktion vorliegen, wurde der bestmögliche mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbare Visus ermittelt. Bei einer im Abstand von sechs Metern angebrachten Projektionstafel für Sehproben (bestehend aus Zahlen und Buchstaben) entsprach eine Sehschärfe von 6/6 einer BCVA von 1,0.

Die mittlere Sehschärfe aller 223 Augen betrug  $0,9 \pm 0,4$ . Zur weiteren Auswertung (s. Abschnitt 3.3.6.) wurden die Augen anhand der BCVA in vier verschiedene Gruppen eingeteilt. Die Augen der Visusgruppe 1 hatten eine Sehschärfe von mehr als 1,0. In diese Gruppe fielen insgesamt 88 Augen, von denen vier Augen die maximal auf der Projektionstafel einstellbare Sehschärfe von 1,6 hatten. Die 73 Augen der Visusgruppe 2 besaßen eine BCVA zwischen 0,8 und 1,0; auf Gruppe 3 entfielen 36 Augen mit einer BCVA von 0,4 bis 0,7, während die übrigen 26 Augen bei einer BCVA unterhalb 0,4 in Gruppe 4 eingeordnet wurden. (Abb. 20).



**Abbildung 20:** Verteilung der 223 Augen mit ermitteltem bestmöglichem Visus auf die vier Visusgruppen.

Die meisten Probanden und Patienten hatten auf beiden Augen die gleiche Sehschärfe, während bei anderen Patienten zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen dem rechten und linken Auge bestanden (Tab. 5). Die drei Patienten, bei denen nur ein Auge untersucht wurde, hatten eine BCVA von 0,8 (Gruppe 2), 0,3 (Gruppe 4) bzw. 1,25 (Gruppe 1).

**Tabelle 5:** Anzahl der Probanden und Patienten in den einzelnen Visusgruppen.

1. Auge 2. Auge	keine Daten	Visusgr. 1	Visusgr. 2	Visusgr. 3	Visusgr. 4
keine Daten	8				
Visusgruppe 1	1	33			
Visusgruppe 2	8	11	21		
Visusgruppe 3	3	6	6	8	
Visusgruppe 4	2	4	5	5	5

Visusgruppe 1: BCVA größer als 1,0.

Visusgruppe 2: BCVA zwischen 0,8 und 1,0.

Visusgruppe 3: BCVA zwischen 0,4 und 0,7.

Visusgruppe 4: BCVA kleiner als 0,4.



### 3.2. Diagnosen und Altersverteilung der Probanden und Patienten

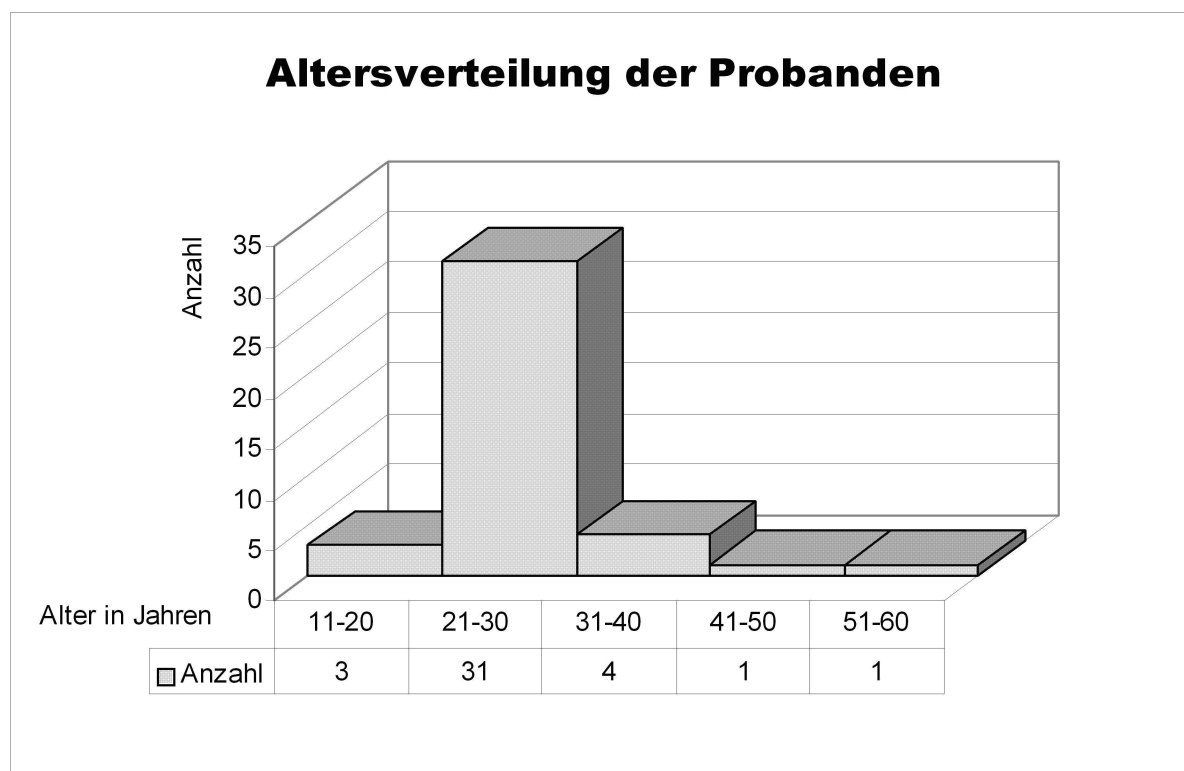
Bei unseren Probanden und Patienten wurden folgende Diagnosen erhoben und in der Auswertung berücksichtigt: Amblyopie, Katarakt, Pseudophakie, Aphakie, ICL (implantierbare Kontaktlinse), Keratitis, Keratokonus, Keratoplastik, Gefäßeinsprossungen in die Hornhaut, andere Hornhautveränderungen, Zustand nach Iridektomie, Hämophthalmus, Zentralvenenthrombose, Zustand nach Astvenenverschluss, diabetische Retinopathie, Retinopathia solaris, Amotio retinae bzw. Zustand nach Amotio retinae, Retinoschisis, Zustand nach Netzhautloch, Maculopathie, Maculaforamen, AMD (altersbedingte Maculadegeneration), Maculaödem, Glaukom bzw. Sekundärglaukom, asymptotische Papillenexkavation, Uveitis, Iritis und Zustand nach abgelaufener Iritis sowie Gesichtsfelddefekt. Dabei unterschieden wir nicht zwischen den einzelnen Katarakt-Stadien, den verschiedenen Formen der AMD, den Glaukom-Formen oder den genauen Einteilungen der Entzündungen des Auges. Des Weiteren nahmen wir nur eine Einteilung der Intraokularlinsen (IOL) nach Multifokallinsen und anderen IOL vor.

Weitere Diagnosen wurden erhoben, fanden aber in unserer Auswertung keine Berücksichtigung, so z. B. chronische Blepharitis, Blepharochalasis, Lidtumoren, Bindehautnävus, Hordeolum externum bzw. internum, Sicca-Syndrom, Heterophorie, Nystagmus, Tränenwegsstenose und Dakrocystitis. Wir gingen davon aus, dass sich diese Veränderungen nicht auf die optischen Eigenschaften und die Sehschärfe des Auges auswirken und somit für die Wellenfrontanalyse und die anderen Messungen weitestgehend irrelevant sind.

### 3.2.1. Probanden

Von unseren insgesamt 40 Probanden hatten 36 zwei gesunde Augen. Bei zwei Probanden war eine einseitige Amblyopie bekannt; bei zwei weiteren wurde im Laufe der Untersuchung eine beidseitige asymptomatische Papillenexkavation entdeckt.

Abbildung 21 zeigt die Altersverteilung der Probanden, deren durchschnittliches Alter  $27 \pm 7$  Jahre betrug.



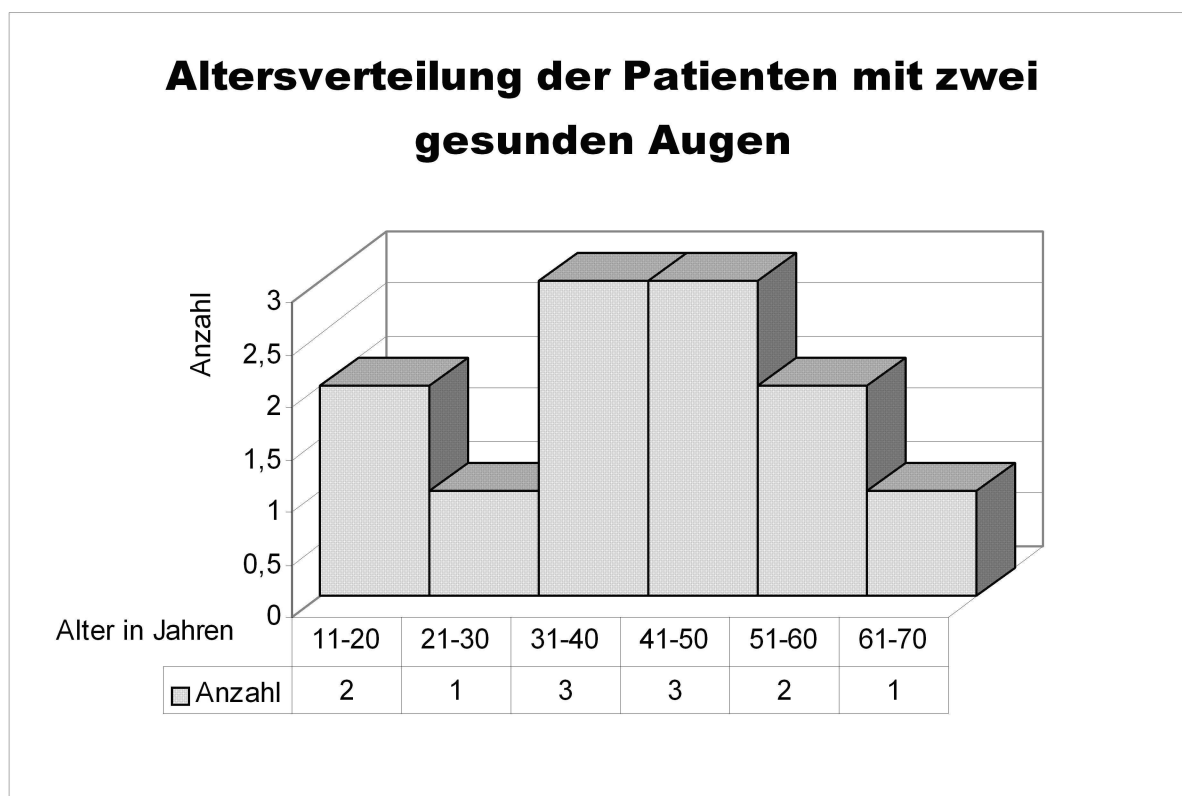
**Abbildung 21:** Altersverteilung der 40 Probanden.

### 3.2.2. Patienten

#### 3.2.2.1. Patienten mit zwei gesunden Augen

Zusätzlich zu den 36 Probanden wurden bei 12 unserer Patienten zwei gesunde Augen festgestellt. Gründe für ihre Vorstellung in der Augenklinik waren z. B. Kontaktlin-senanpassungen bei hoher Myopie bzw. hohem Astigmatismus, konsiliarische Unter-suchungen zur Abklärung eines Tinnitus bzw. zur präoperativen Kontrolle der Augen bei einem geplanten neurochirurgischen Eingriff oder der Beratungswunsch eines Pa-tienten hinsichtlich refraktiver Chirurgie. Dabei zählten wir hohe Myopien oder einen hohen Astigmatismus nicht zu den Diagnosen, sondern zu den Sehfehlern.

An folgendem Diagramm ist die Altersverteilung dieser Patienten ersichtlich (Abb. 22). Das durchschnittliche Alter betrug  $40 \pm 15$  Jahre.



**Abbildung 22:** Altersverteilung von 12 Patienten ohne relevante Augenerkrankungen.

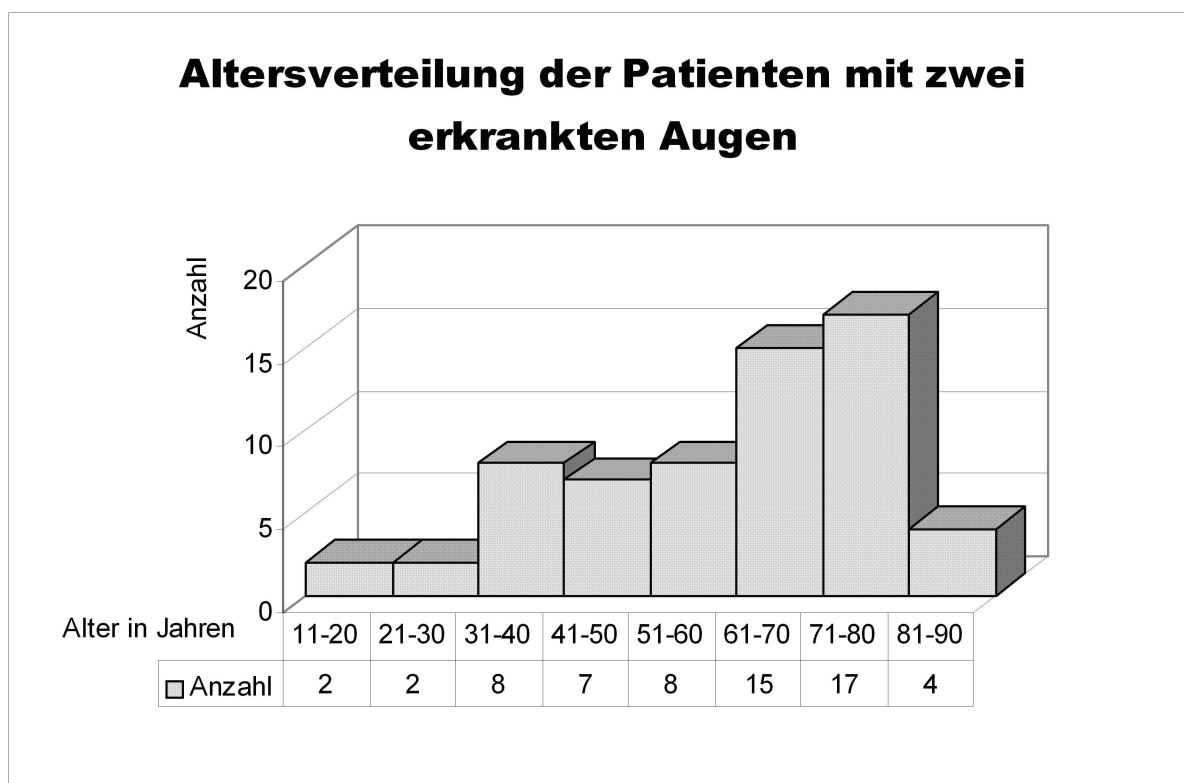
### **3.2.2.2. Patienten mit einem gesunden und einem erkrankten Auge**

Außer den zwei oben erwähnten Probanden mit einer einseitigen Amblyopie wiesen acht Patienten ein erkranktes Auge auf, während beim zweiten Auge keine relevanten Diagnosen bestanden. Bei allen acht Augen wurde nur eine Diagnose festgestellt; es handelte sich in drei Fällen um eine Amblyopie, in zwei Fällen um einen Keratokonus, je einmal kamen die Diagnosen Uveitis, Zustand nach Astvenenverschluss und nicht genauer definierte Hornhautveränderung vor. Das Alter der Patienten mit einseitiger Amblyopie betrug 15, 28 und 50 Jahre; die Patienten mit Keratokonus waren 25 und 29, mit Uveitis 19, mit Zustand nach Astvenenverschluss 50 und mit der Hornhautveränderung 38 Jahre alt. Somit lag das Durchschnittsalter bei 32 Jahren.

Bei drei Patienten wurde nur je ein Auge untersucht. Von diesen drei Augen waren zwei gesund, beim dritten bestand eine Keratoplastik. Erstere Patienten waren 29 und 45, der zuletzt genannte Patient 63 Jahre alt.

### 3.2.2.3. Patienten mit zwei erkrankten Augen

Oben genannt wurden bereits zwei Probanden, bei denen eine vorher nicht bekannte beidseitige asymptomatische Papillenexkavation gefunden wurde. Des Weiteren hatten bei 63 Patienten beide Augen eine bis drei relevante Diagnosen. Abbildung 23 zeigt die Altersverteilung dieser 63 Patienten, deren durchschnittliches Alter  $59 \pm 18$  Jahre betrug.



**Abbildung 23:** Altersgruppen bei 63 Patienten mit signifikanten Diagnosen auf beiden Augen.

Von diesen 63 Patienten hatten 31 insgesamt 2 Diagnosen, d. h. auf jedem Auge bestand eine relevante Diagnose. Acht Patienten hatten insgesamt drei, 16 Patienten vier und jeweils vier Patienten fünf bzw. sechs Diagnosen. Die nachfolgenden Tabellen zeigen eine Übersicht über Diagnosen, Geschlecht und Alter dieser Gruppe (Tab. 6 bis 9).

**Tabelle 6:** Patienten mit je einer Diagnose pro Auge.

Anzahl der Patienten, Geschlecht, Alter	Diagnosen
1 Pat., w 20 J.	Amblyopie beidseits
8 Pat., m 67, 75, 81 J.; w 45, 48, 61, 78, 80 J.	Katarakt beidseits
1 Pat., w 66 J.	Katarakt und Pseudophakie
4 Pat., m 31, 61, 61 J.; w 67 J.	Katarakt und MFL
3 Pat., m 88 J.; w 51, 66 J.	Pseudophakie beidseits
2 Pat., m 58 J.; w 57 J.	MFL beidseits
1 Pat., w 74 J.	Pseudophakie und Aphakie
2 Pat., m 33, 34 J.	Keratokonius beidseits
1 Pat., m 36 J.	Keratokonius und Keratoplastik
1 Pat., w 32 J.	Hornhautgefäße beidseits
1 Pat., m 34 J.	Retinoschisis beidseits
1 Pat., m 44 J.	Retinopathia solaris beidseits
2 Pat., m 77 J.; w 36 J.	Glaukom beidseits
1 Pat., w 20 J.	Uveitis beidseits
1 Pat., m 27 J.	Uveitis und Z. n. Iritis
1 Pat., m 37 J.	Gesichtsfelddefekt beidseits

m = männlich, w = weiblich, MFL = Multifokallinse, Altersangabe in Jahren zum Untersuchungszeitpunkt. Die Diagnosen sind unabhängig von ihrem Auftreten auf dem rechten oder linken Auge aufgeführt.

**Tabelle 7:** Patienten mit insgesamt drei Diagnosen.

Geschlecht	Alter	Diagnosen RA	Diagnosen LA
m	62	diabet. Retinopathie, Hämophthalmus	diabet. Retinopathie
m	72	Pseudophakie	Pseudophakie, Hornhauterosionen
m	81	Katarakt	Katarakt, AMD
w	46	Glaukom	Glaukom, Zentralvenenthrombose
w	55	Katarakt	Pseudophakie, Keratitis
w	69	Katarakt	Pseudophakie, Keratoplastik
w	70	Katarakt	Aphakie, Keratoplastik
w	81	Pseudophakie, Keratoplastik	Katarakt

RA = rechtes Auge, LA = linkes Auge, AMD = altersabhängige Maculadegeneration, Altersangabe in Jahren zum Untersuchungszeitpunkt.

**Tabelle 8:** Patienten mit vier relevanten Diagnosen.

G.	A.	Diagnosen RA	Diagnosen LA
m	29	Katarakt, Hornhautdegeneration	Katarakt, Keratoplastik
m	50	Katarakt	Pseudophakie, Z. n. Amotio retinae, Sekundärglaukom
m	56	Glaukom, Keratoplastik, Keratitis	Glaukom
m	66	Katarakt, AMD	Katarakt, AMD
m	70	Katarakt, AMD	Katarakt, AMD
m	77	Katarakt, AMD	Katarakt, AMD
w	46	diabet. Retinopathie, Pseudophakie, Z. n. Amotio retinae	diabet. Retinopathie
w	64	Katarakt, Gesichtsfelddefekt	Katarakt, Gesichtsfelddefekt
w	69	Pseudophakie, AMD	Pseudophakie, AMD
w	72	Pseudophakie, AMD	Pseudophakie, AMD
w	73	Katarakt, Hornhautveränderungen	Pseudophakie, Hornhautveränderungen
w	74	Katarakt, AMD	Katarakt, AMD
w	74	Pseudophakie, AMD	Pseudophakie, AMD
w	75	Pseudophakie, diabet. Retinopathie	Pseudophakie, diabet. Retinopathie
w	78	Katarakt	Pseudophakie, AMD, Z. n. Hornhautverletzung
w	80	Katarakt, AMD	Katarakt, AMD

RA = rechtes Auge, LA = linkes Auge, AMD = altersabhängige Maculadegeneration, Altersangabe in Jahren zum Untersuchungszeitpunkt.

**Tabelle 9:** Diagnosen der Patienten mit fünf bzw. sechs relevanten Befunden.

G.	A.	Diagnosen RA	Diagnosen LA
m	51	Katarakt, asympt. Papillenexkavation, Maculaforamen	Katarakt, asympt. Papillenexkavation
m	60	Katarakt, Glaukom, AMD	Katarakt, Glaukom
w	55	Katarakt, ICL, Z. n. Netzhautloch	Katarakt, ICL
w	73	Katarakt, diabet. Retinopathie, Maculaödem	Katarakt, diabet. Retinopathie
m	49	Keratoplastik, Aphakie, Z. n. Iridektomie	Keratoplastik, Aphakie, Z. n. Iridektomie
m	64	Katarakt, Glaukom, diabet. Retinopathie	Katarakt, Glaukom, diabet. Retinopathie
m	75	Pseudophakie, AMD, Amotio retinae	Pseudophakie, AMD, diabet. Retinopathie
w	77	Katarakt, diabet. Retinopathie, Maculaödem	Katarakt, diabet. Retinopathie, ischäm. Maculopathie

RA = rechtes Auge, LA = linkes Auge, AMD = altersabhängige Maculadegeneration, ICL = implantierbare Kontaktlinse (bei hoher Myopie), Altersangabe wie oben.

### 3.2.3. Zusammenfassung der Diagnosen

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über alle Diagnosen, die bei unseren Versuchspersonen erhoben wurden, sowie deren Zuordnung zu den entsprechenden Vergleichsgruppen.

**Tabelle 10:** Diagnosen und Zuordnung zu Vergleichsgruppen.

Diagnose	Anzahl der Augen	Gruppe <sup>1</sup>	
Amblyopie	7	Amblyopie	
Katarakt	56	Katarakt	
Pseudophakie (ohne MFL)	27	Pseudophakie	IOL
Multifokallinse (MFL)	8	MFL	
Aphakie	4		
Implantierbare Kontaktlinse (ICL)	2		
Keratitis	2	Hornhauterkrankungen	
Keratokonius	7		
Keratoplastik	9		
Hornhautgefäße	2		
unklare Hornhautveränderungen	6		
Iridektomie	2		
Hämophthalmus	1		
Zentralvenenthrombose	1		
Z.n. Astvenenverschluss	1		
diabetische Retinopathie	13		Netzhaut- erkrankungen
Retinopathia solaris	2		
Amotio retinae	1		
Zustand nach Amotio retinae	2		
Retinoschisis	2		
Zustand nach Netzhautloch	1		
ischämische Maculopathie	1		
Maculaforamen	1		
altersbedingte Maculadegeneration (AMD)	21	AMD	
Maculaödem	2		
Glaukom / Sekundärglaukom	13	Glaukom	
Papillenexkavation (asymptomatisch)	6		
Uveitis	4		
Zustand nach Iritis	1		
Gesichtsfelddefekt	4		

<sup>1</sup> Zuordnung der Augen zu den einzelnen Vergleichsgruppen. Augen mit mehreren Diagnosen können mehreren Vergleichsgruppen zugeordnet sein.

IOL = Intraokularlinse, MFL = Multifokallinse, ICL = implantierbare Kontaktlinse, AMD = altersabhängige Maculadegeneration.



### 3.3. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse

#### 3.3.1. Nicht durchführbare Messungen

Bei 16 der untersuchten Augen war die Durchführung der Wellenfrontanalyse mit WASCA nicht möglich. Die Ursachen liegen zum einen darin, dass bei einigen Messungen der Messbereich überschritten wurde (z. B. sehr hohe Myopie, sehr hoher Astigmatismus, Aphakie oder Keratokonus). Zum anderen schienen bestimmte Erkrankungen eine Penetration des Messstrahles in das Auge zu verhindern. Dies war zum Beispiel der Fall bei fortgeschrittener Katarakt oder Hämophthalmus. Tab. 11 zeigt eine Übersicht über diese 16 Augen mit den relevanten Diagnosen.

**Tabelle 11:** Augen, bei denen keine Wellenfrontanalyse möglich war.

Geschl., Alter des Patienten	Auge	Diagnosen
m, 27 J.	RA	Uveitis
	LA	Z. n. Iritis
m, 29 J.	RA	Katarakt, Hornhautdegeneration
	LA	Katarakt, Keratoplastik
m, 29 J.	LA	Keratokonius
m, 49 J.	RA	Aphakie, Keratoplastik, Z. n. Iridektomie
	LA	Aphakie, Keratoplastik, Z. n. Iridektomie
m, 62 J.	RA	Hämophthalmus
w, 42 J.	RA	hohe Myopie (−21 dpt)
	LA	hohe Myopie (−20 dpt)
w, 66 J.	RA	Katarakt
	LA	Pseudophakie
w, 73 J.	RA	Katarakt, Hornhautveränderungen (V. a. KCE-Folge)
w, 74 J.	LA	Aphakie
w, 77 J.	RA	Katarakt, diabet. Retinopathie, Maculaödem
	LA	Katarakt, diabet. Retinopathie, ischämische Maculopathie

m = männlich, w = weiblich, RA = rechtes Auge, LA = linkes Auge, KCE = Keratokonjunktivitis epidemica.

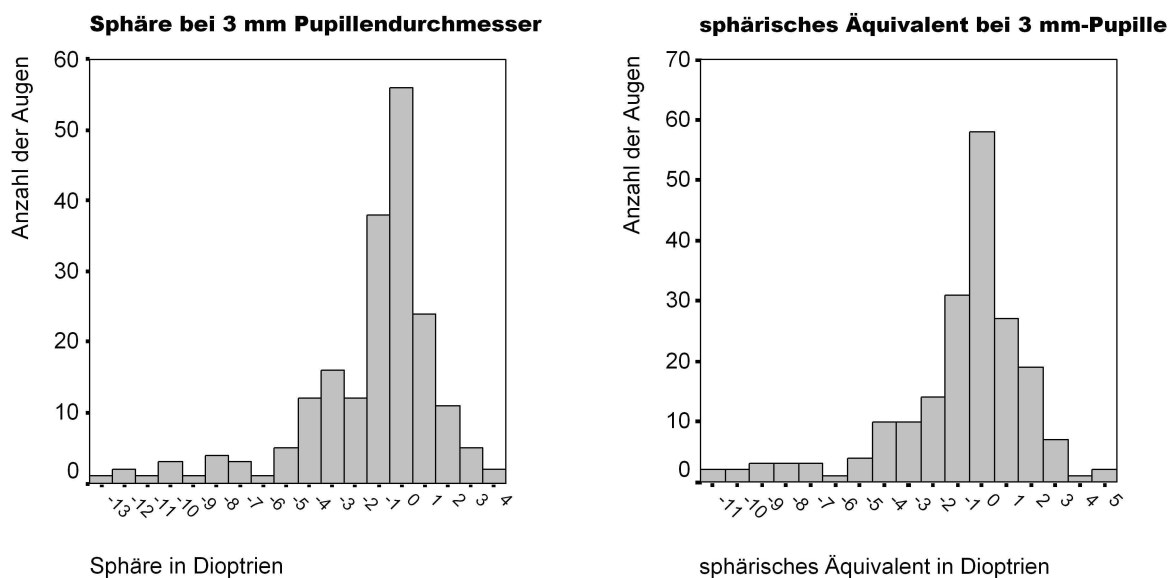
Weitere vier Augen wurden aus verschiedenen Gründen nicht mit dem Aberrometer untersucht. Bei 20 Augen in der Anfangsphase der Messungen wurde versäumt, die Rohdaten zu sichern, so dass im Nachhinein keine Umrechnung auf eine normierte Pupillengröße mehr möglich war. Ein Auge wurde lediglich mit Kontaktlinse vermessen und somit aus der Studie ausgeschlossen. Schließlich betrug bei 11 Augen der

Pupillendurchmesser weniger als 3 mm; dadurch kommen auch diese für die weitere Auswertung nicht in Betracht.

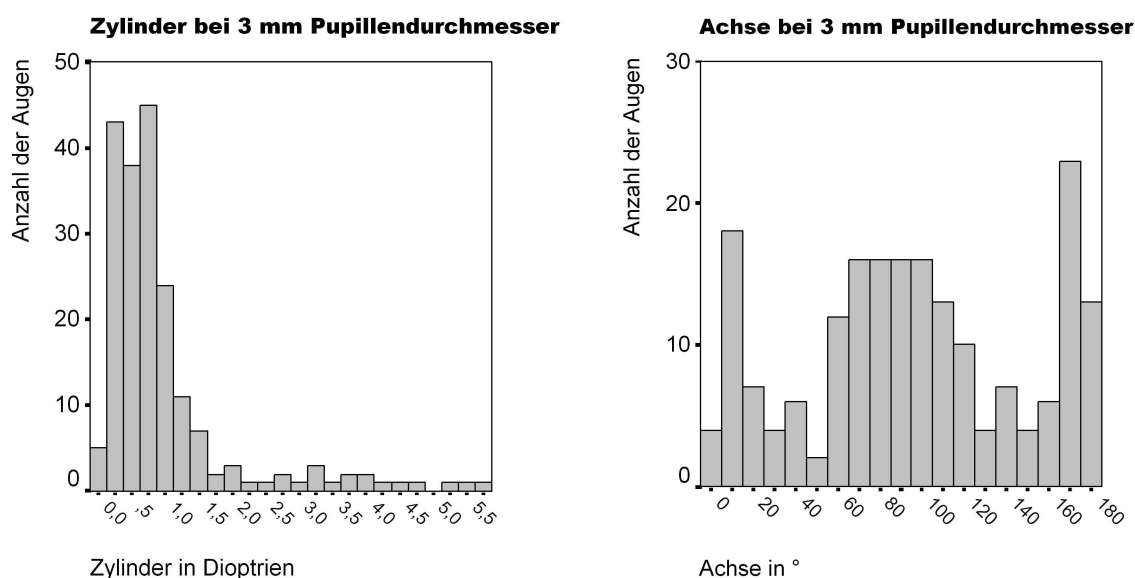
Insgesamt wurde somit die Wellenfrontanalyse für 197 Augen auf einen Pupillendurchmesser von 3 mm skaliert; bei einem Durchmesser von 4 mm sind es 159 Augen; den zu Anfang der Studie gewünschten Pupillendurchmesser von 5 mm erreichten lediglich 105 Augen. In die jeweiligen Datenbanken aufgenommen wurden nur Augen, für die mindestens zwei auf die jeweilige Größe normierte Messungen vorhanden waren. In den meisten Fällen wurde der Mittelwert aus jeweils drei Messungen berechnet. Bei vielen Probanden lagen mehr als drei Datensätze vor. Hier wurden drei hintereinander ausgeführte Messungen ausgewählt, deren Pupillendurchmesser nahe dem Skalierungswert von 3, 4 bzw. 5 mm lag.

### 3.3.2. Messung von Sphäre, Zylinder und Achse mittels WASCA

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der mittels Wellenfrontanalyse ermittelten Refraktionsfehler für die 197 Augen, für die eine auf 3 mm Pupillendurchmesser skalierte Messung vorliegt (Abb. 24 und 25).



**Abbildung 24:** Sphäre und sphärisches Äquivalent für 197 mit WASCA vermessene Augen (Mittelwert  $\pm$  Standardabw.: Sphäre  $-1,3 \pm 3,0$  dpt; sphärisches Äquivalent  $-0,8 \pm 2,8$  dpt).



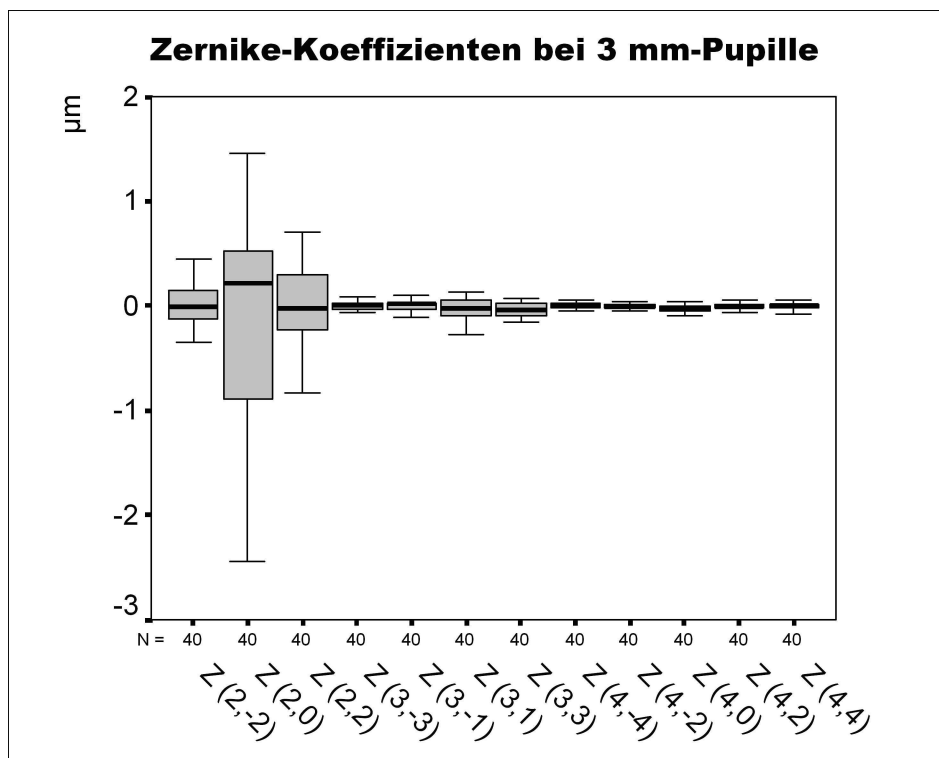
**Abbildung 25:** Zylinder und Achse für 197 mit WASCA vermessene Augen (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung: Zylinder  $1,0 \pm 1,0$  dpt; Achse  $96 \pm 54^{\circ}$ ).

### 3.3.3. Verteilung der Wellenfrontaberrationen in einer gesunden Population

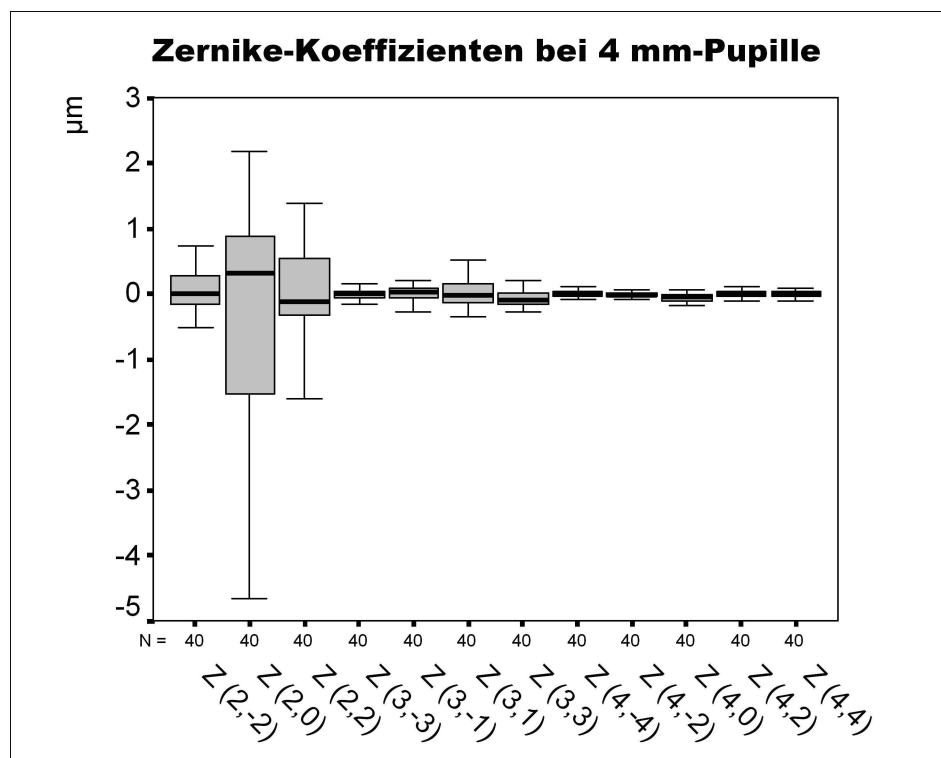
Im Folgenden werden die mit WASCA ermittelten Messwerte für die Zernike-Koeffizienten und RMS-Werte in Abhängigkeit vom Pupillendurchmesser dargestellt. Die Abbildungen beziehen sich dabei jeweils auf die vierzig gesunden Augen, von denen Werte für einen Pupillendurchmesser von mindestens fünf Millimetern vorliegen. Dabei wird pro Patient bzw. Proband nur je ein Auge berücksichtigt, welches bei Vorhandensein von Werten für zwei gesunde Augen pro Person durch Zufall ausgewählt wurde.

Die Abbildungen 26, 27 und 28 zeigen die Verteilung der Zernike-Koeffizienten bei einer Skalierung von 3, 4 bzw. 5 mm für diese gesunden Augen. Zu beachten sind die unterschiedlichen Einteilungen der  $y$ -Achse.

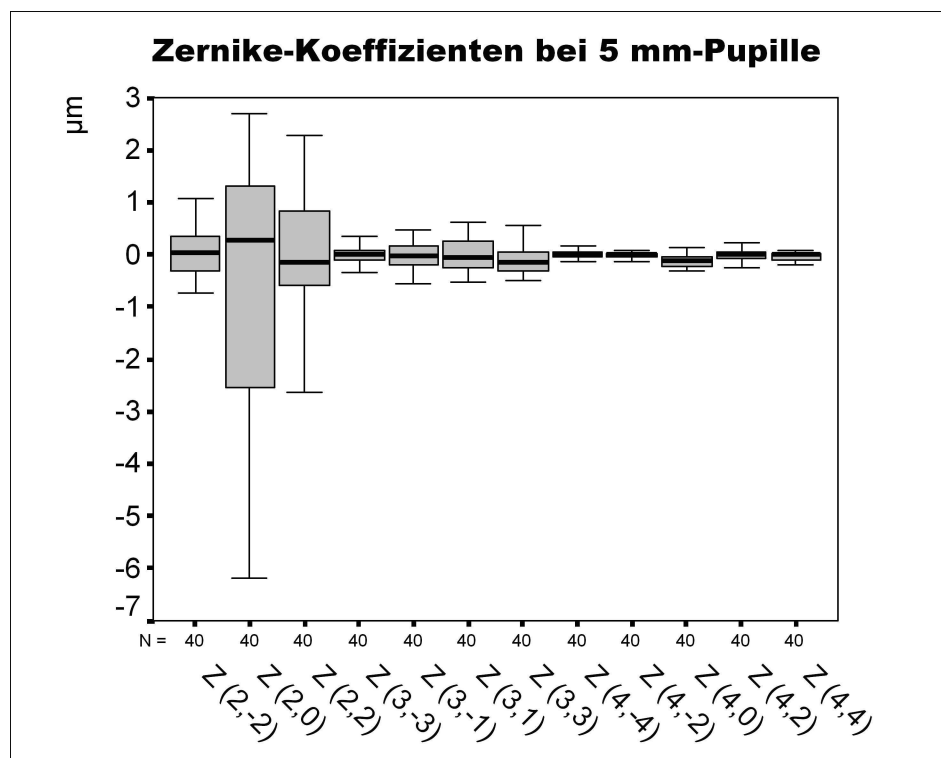
Exemplarisch sind in den Abbildungen 29 und 30 die Boxplots der Koeffizienten  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für die drei verschiedenen Durchmesser bei gleicher Skaleneinteilung nebeneinander dargestellt.



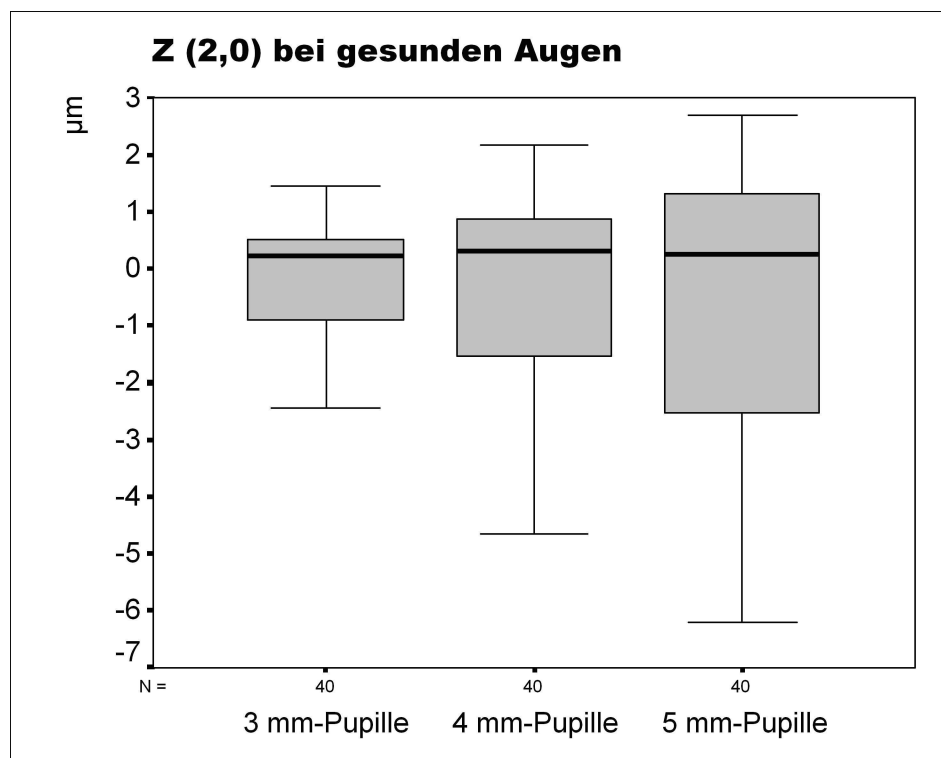
**Abbildung 26:** Verteilung der Zernike-Koeffizienten bei 40 gesunden Augen, berechnet für einen Pupillendurchmesser von 3 mm.



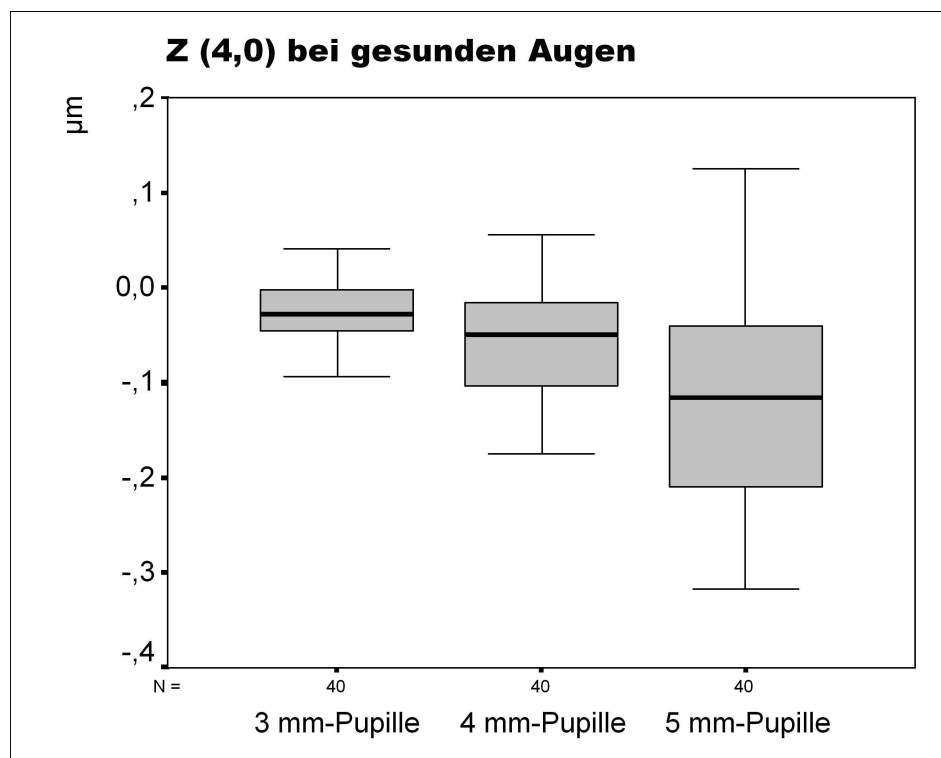
**Abbildung 27:** Verteilung der Zernike-Koeffizienten bei 40 gesunden Augen, berechnet für einen Pupillendurchmesser von 4 mm.



**Abbildung 28:** Verteilung der Zernike-Koeffizienten bei 40 gesunden Augen, berechnet für einen Pupillendurchmesser von 5 mm.



**Abbildung 29:** Boxplots von  $Z_2^0$  für drei verschiedene Pupillendurchmesser.



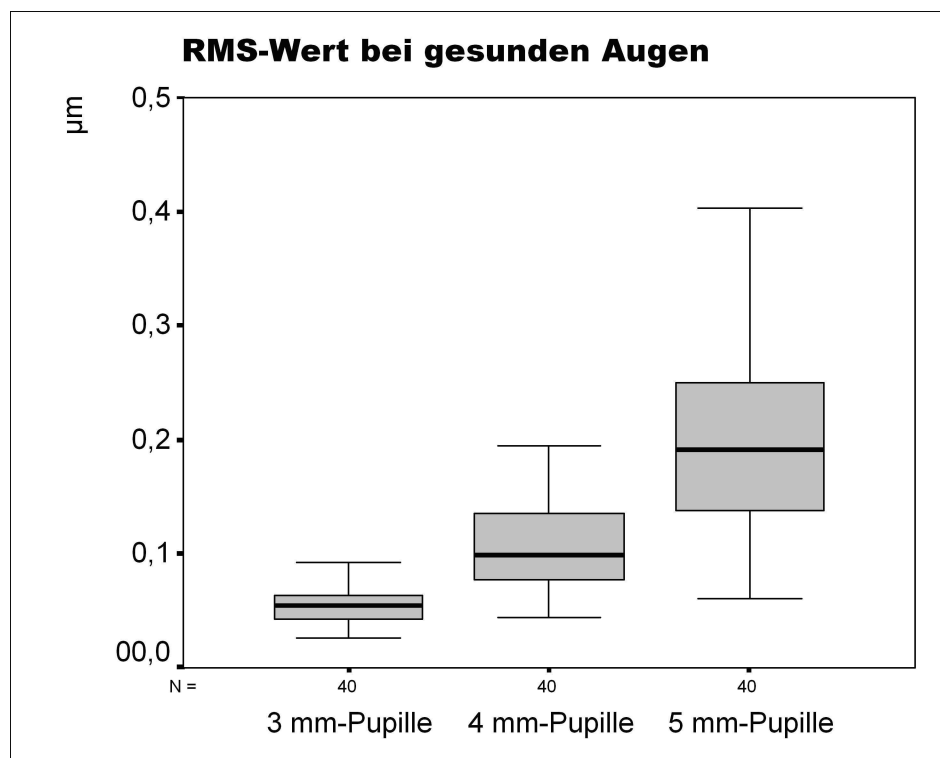
**Abbildung 30:** Boxplots von  $Z_4^0$  für drei verschiedene Pupillendurchmesser.

In Tabelle 12 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zernike-Koeffizienten im Vergleich zwischen den unterschiedlichen Pupillendurchmessern zusammengefasst.

**Tabelle 12:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Zernike-Koeffizienten für 40 gesunde Augen bei einem Pupillendurchmesser von 3, 4 bzw. 5 mm.

Zernike-Koeffizient	MW $\pm$ Stabw bei 3 mm	MW $\pm$ Stabw bei 4 mm	MW $\pm$ Stabw bei 5 mm
$Z_2^{-2}$	$-0,013 \pm 0,23$	$-0,028 \pm 0,40$	$-0,063 \pm 0,62$
$Z_2^0$	$-0,331 \pm 1,36$	$-0,673 \pm 2,39$	$-1,168 \pm 3,63$
$Z_2^2$	$0,063 \pm 0,52$	$0,099 \pm 0,89$	$0,116 \pm 1,32$
$Z_3^{-3}$	$-0,002 \pm 0,05$	$-0,0003 \pm 0,09$	$0,005 \pm 0,17$
$Z_3^{-1}$	$0,002 \pm 0,06$	$-0,001 \pm 0,12$	$-0,018 \pm 0,23$
$Z_3^1$	$-0,019 \pm 0,09$	$-0,007 \pm 0,20$	$0,002 \pm 0,38$
$Z_3^3$	$-0,050 \pm 0,10$	$-0,087 \pm 0,18$	$-0,117 \pm 0,29$
$Z_4^{-4}$	$0,006 \pm 0,03$	$0,002 \pm 0,05$	$-0,003 \pm 0,09$
$Z_4^{-2}$	$-0,003 \pm 0,02$	$-0,008 \pm 0,03$	$-0,012 \pm 0,05$
$Z_4^0$	$-0,022 \pm 0,03$	$-0,060 \pm 0,07$	$-0,116 \pm 0,14$
$Z_4^2$	$-0,006 \pm 0,03$	$-0,012 \pm 0,08$	$-0,028 \pm 0,19$
$Z_4^4$	$-0,005 \pm 0,03$	$-0,005 \pm 0,05$	$-0,030 \pm 0,09$

Abbildung 31 stellt die Verteilung des RMS-Wertes bei einem Pupillendurchmesser von 3, 4 bzw. 5 mm im direkten Vergleich dar.

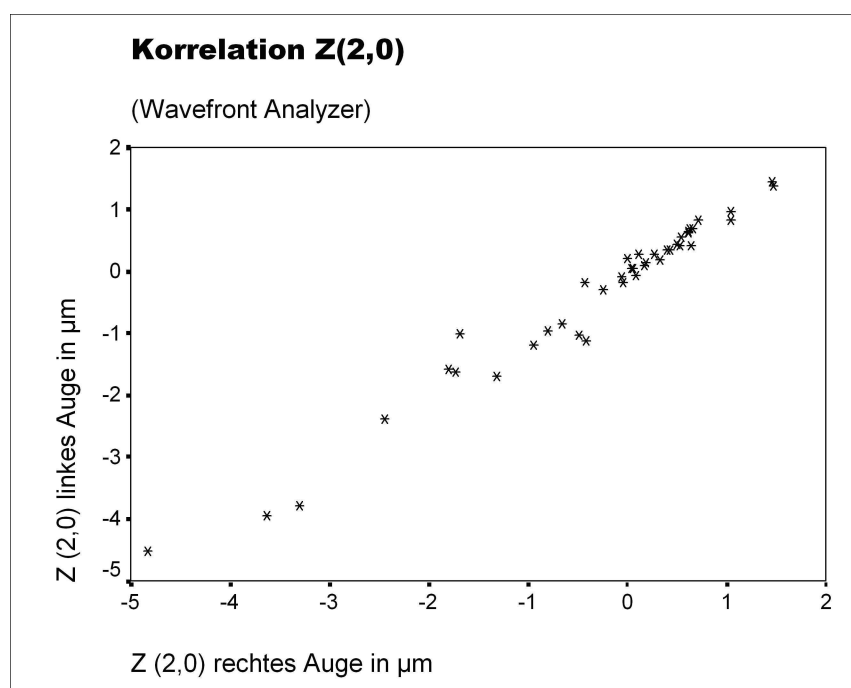


**Abbildung 31:** RMS-Wert für 40 gesunde Augen. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung:  $0,059 \pm 0,03 \mu\text{m}$  (Pupillendurchmesser 3 mm);  $0,113 \pm 0,06 \mu\text{m}$  (4 mm);  $0,206 \pm 0,11 \mu\text{m}$  (5 mm).

### 3.3.4. Intraindividuelle Unterschiede der Wellenfrontaberrationen

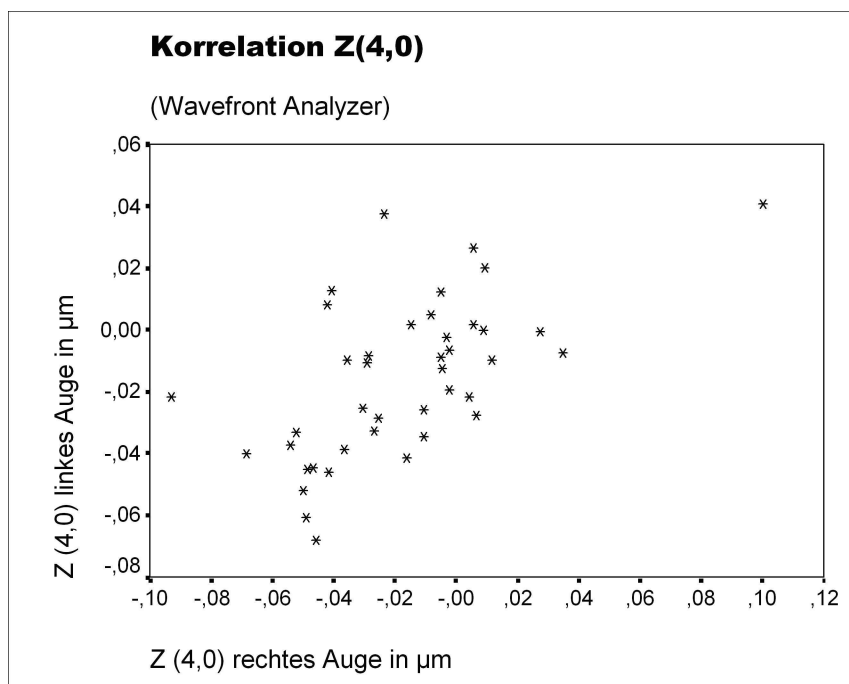
Für 41 gesunde Probanden wurden die Ergebnisse der Wellenfrontanalyse im Vergleich zwischen rechtem und linkem Auge derselben Person ausgewertet. Dabei zeigten sich hohe positive Korrelationen beim besten korrigierten Visus ( $R = 0,761$ ), bei Sphäre ( $R = 0,990$  bzw.  $0,981$  für subjektive Refraktion bzw. Wellenfrontmessung), Zylinder ( $R = 0,927$  bzw.  $0,907$ ) und sphärischem Äquivalent ( $R = 0,992$  bzw.  $0,985$ ), sowie bei den Pupillendurchmessern ( $R = 0,953$  für die Messung mittels WASCA). Ebenso ergaben sich für folgende Zernike-Koeffizienten signifikante Korrelationen:  $Z_2^{-2}$ ,  $Z_2^0$ ,  $Z_2^2$ ,  $Z_3^{-1}$ ,  $Z_3^1$ ,  $Z_3^3$ ,  $Z_4^0$ .

Abbildung 32 veranschaulicht den Vergleich zwischen Defokus des rechten und linken Auges; in Abbildung 33 ist der Zusammenhang beim Öffnungsfehler dargestellt.



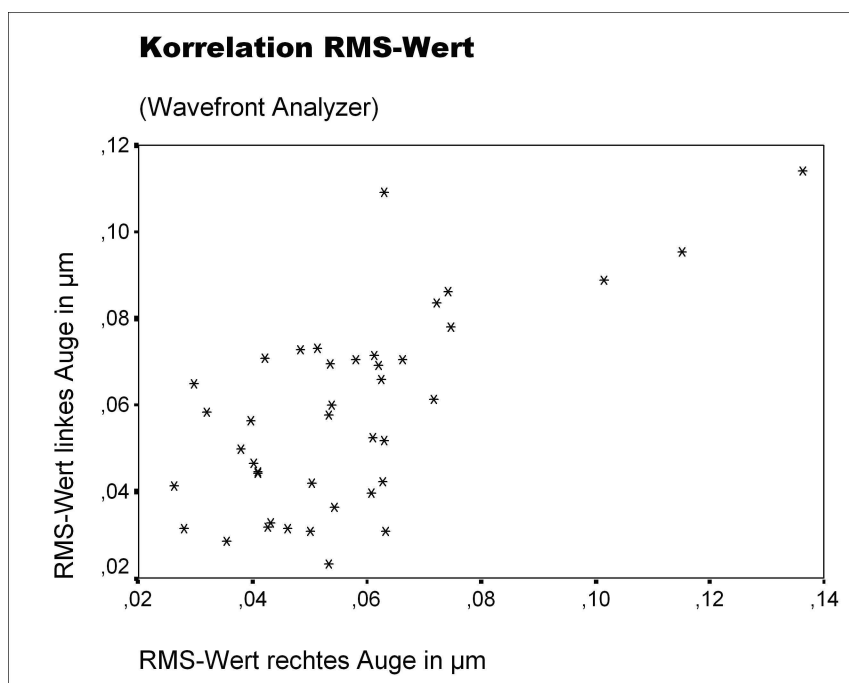
**Abbildung 32:** Streudiagramm von  $Z_2^0$  des rechten und linken Auges bei 41 augengesunden Probanden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt  $0,985$ ; der Wilcoxon-Test ergibt keinen signifikanten Unterschied ( $p = 0,086$ ).





**Abbildung 33:** Streudiagramm von  $Z_4^0$  des rechten und linken Auges bei 41 augengesunden Probanden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt 0,591; der Wilcoxon-Test ergibt keinen signifikanten Unterschied ( $p = 0,943$ ).

Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient betrug für den RMS-Wert 0,668 (Abb. 34).



**Abbildung 34:** Streudiagramm der RMS-Werte des rechten und linken Auges bei 41 augengesunden Probanden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt 0,668; der Wilcoxon-Test ergibt keinen signifikanten Unterschied ( $p = 0,771$ ).

### 3.3.5. Vergleiche der unterschiedlichen Krankheitsgruppen

#### 3.3.5.1. Erkrankungen der Linse, Pseudophakien

In diesem Teil der Arbeit werden die Messwerte gesunder Augen mit denen von Patienten mit Katarakt bzw. nach Implantation einer künstlichen Linse verglichen. In jede Vergleichsgruppe wurde nur jeweils ein Auge eines Probanden oder Patienten aufgenommen, auch wenn das andere Auge ebenfalls gesund war bzw. die gleiche Krankheit aufwies. Daher wurde zum Beispiel von den insgesamt 108 gesunden Augen von 60 Patienten bzw. Probanden nur jeweils ein Auge ausgewählt. Die Auswahl des jeweiligen Auges bei Studienteilnehmern mit zwei gesunden Augen erfolgte per Zufall. Da nicht alle Messungen bei allen Augen möglich waren bzw. aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt wurden, liegt zum Beispiel nur für 53 der insgesamt 60 gesunden Augen der Vergleichsgruppe eine Wellenfrontanalyse mit der Skalierung 3 mm vor. Da sich für die Skalierungen auf einen Pupillendurchmesser von 4 bzw. 5 mm die Fallzahlen in den jeweiligen Gruppen stark verringerten, wurde auf die Auswertung dieser Messergebnisse verzichtet.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Anzahl der Augen in den verschiedenen Gruppen sowie über die Anzahl der Augen, für die eine subjektive Refraktion bzw. eine Wellenfrontanalyse mit der Skalierung auf 3 mm vorliegen.

**Tabelle 13:** Vergleichsgruppen für die Analyse der Aberrationen höherer Ordnung bei Augen mit Erkrankungen der Linse.

	<b>Gesamtzahl</b>	<b>subj. Refraktion</b>	<b>Wellenfrontanalyse</b>
<b>gesunde Augen</b>	60	58	53
<b>Augen mit Katarakt</b>	34	31	25
<b>Augen mit Pseudophakie</b>	24	19	18
– davon Multifokallinse	6	5	6
– davon andere IOL	18	14	12

#### Unterschiede im besten korrigierten Visus

Zunächst wurde der Mittelwert des besten mit sphärischen und zylindrischen Gläsern erreichbaren Visus der einzelnen Gruppen bestimmt und untereinander verglichen. Die Mittelwerte des BCVA zeigt Tabelle 14; Tabelle 15 enthält die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests zum Vergleich des BCVA in den einzelnen Gruppen.

**Tabelle 14:** Mittelwerte des BCVA in Abhängigkeit von Erkrankungen der Linse.

	<b>besten korrigierter Visus (MW <math>\pm</math> Stabw)</b>
<b>gesunde Augen (<math>n = 58</math>)</b>	1,15 $\pm$ 0,20
<b>Augen mit Katarakt (<math>n = 31</math>)</b>	0,76 $\pm$ 0,32
<b>Augen mit künstlicher Linse (<math>n = 19</math>)</b>	0,73 $\pm$ 0,40
– davon Multifokallinse ( $n = 5$ )	0,99 $\pm$ 0,27
– davon andere IOL ( $n = 14$ )	0,65 $\pm$ 0,41

**Tabelle 15:** Unterschiede im BCVA zwischen den Erkrankungen der Linse, Signifikanzen für Mann-Whitney-U-Test.

	<b>Katarakt</b>	<b>alle Linsen</b>	<b>MFL</b>	<b>andere IOL</b>
<b>gesund (<math>n = 58</math>)</b>	< 0,05*	< 0,05*	0,17	< 0,05*
<b>Katarakt (<math>n = 31</math>)</b>		0,99	0,15	0,44
<b>alle Linsen (<math>n = 19</math>)</b>				
<b>MFL (<math>n = 5</math>)</b>				0,13

\* signifikanter Unterschied im BCVA.

### Unterschiede in den Ergebnissen der Wellenfrontanalyse

In den Tabellen 16 und 17 sind die Mittelwerte der RMS-Werte in den verschiedenen Vergleichsgruppen sowie die Ergebnisse des Mittelwertvergleiches mittels Mann-Whitney-U-Test zwischen den unterschiedlichen Gruppen aufgeführt.

**Tabelle 16:** Mittelwerte der RMS-Werte in Abhängigkeit von Erkrankungen der Linse.

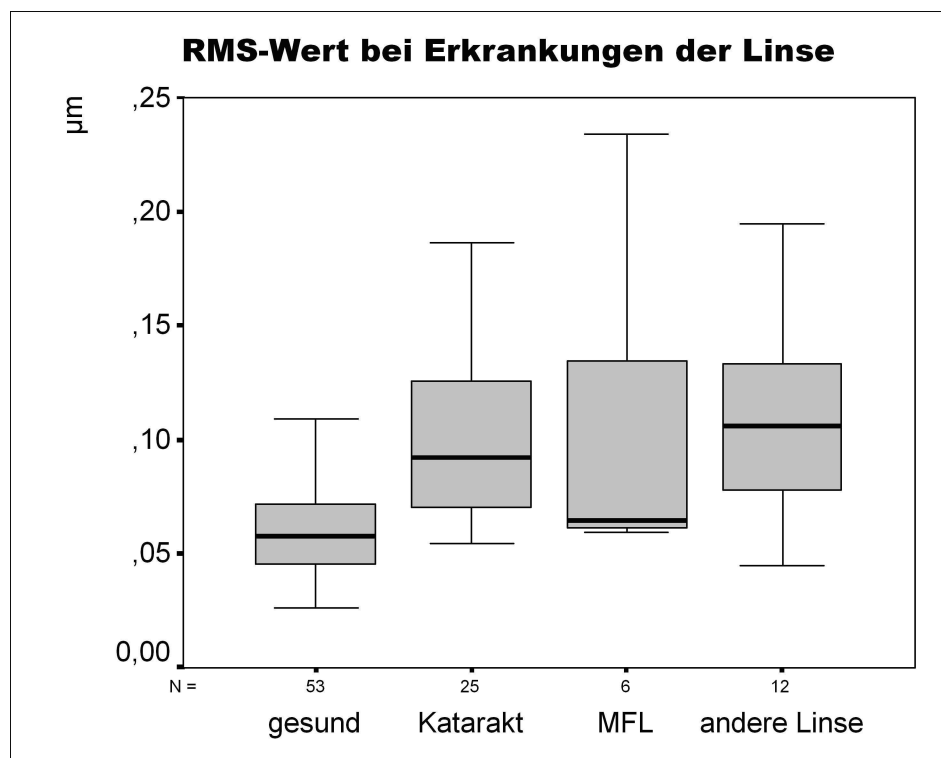
	<b>RMS-Wert (MW <math>\pm</math> Stabw)</b>
<b>gesunde Augen (<math>n = 53</math>)</b>	0,061 $\pm$ 0,03
<b>Augen mit Katarakt (<math>n = 25</math>)</b>	0,106 $\pm$ 0,04
<b>Augen mit künstlicher Linse (<math>n = 18</math>)</b>	0,108 $\pm$ 0,05
– davon Multifokallinse ( $n = 6$ )	0,103 $\pm$ 0,07
– davon andere IOL ( $n = 12$ )	0,111 $\pm$ 0,04

**Tabelle 17:** Unterschiede im RMS-Wert zwischen den Erkrankungen der Linse bzw. bei Pseudophakie, Signifikanzen für Mann-Whitney-U-Test.

	<b>Katarakt</b>	<b>alle Linsen</b>	<b>MFL</b>	<b>andere IOL</b>
<b>gesund (<math>n = 53</math>)</b>	< 0,05*	< 0,05*	0,071	< 0,05*
<b>Katarakt (<math>n = 25</math>)</b>		0,902	0,317	0,626
<b>alle Linsen (<math>n = 18</math>)</b>				
<b>MFL (<math>n = 6</math>)</b>				0,303

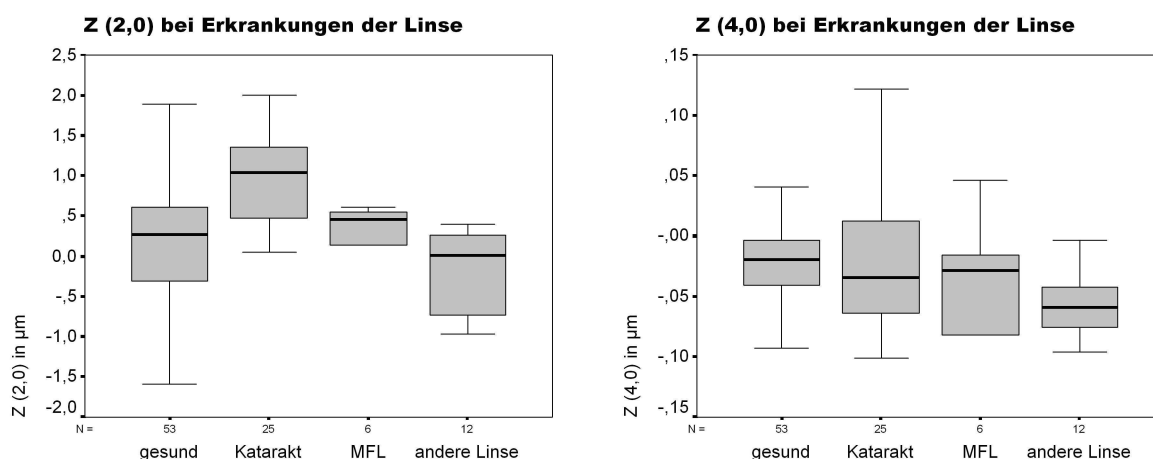
\* signifikanter Unterschied im RMS-Wert.

Abbildung 35 veranschaulicht die Verteilung der RMS-Werte für die unterschiedlichen Vergleichsgruppen.



**Abbildung 35:** Verteilung des RMS-Wertes für 53 gesunde Augen, 25 Augen mit Katarakt, 6 Augen mit Multifokallinse und 12 Augen mit anderen IOL (Pupillendurchmesser 3 mm).

Abbildung 36 zeigt die Zernike-Koeffizienten für Defokus und Öffnungsfehler im Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Katarakt bzw. implantierten Linsen.



**Abbildung 36:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 53 gesunde Augen, 25 Augen mit Katarakt, 6 Augen mit Multifokallinse und 12 Augen mit anderen IOL (Pupillendurchmesser 3 mm).

### 3.3.5.2. Erkrankungen der Retina

Analog zu den Erkrankungen der Linse wurden auch für die retinalen Erkrankungen Vergleichsgruppen gebildet, die nur jeweils ein Auge eines Patienten oder Probanden enthalten. Zusätzlich zum Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Erkrankungen der Netzhaut werden auch Vergleiche mit den Werten von Augen mit einer altersbedingten Maculadegeneration (AMD) geführt. Die Gruppe der Augen mit anderen Netzhauterkrankungen enthält zum Beispiel Augen mit diabetischer Retinopathie. Tabelle 18 zeigt, wie viele Augen sich in den Gruppen befinden und für wie viele dieser Augen eine subjektive Refraktion bzw. eine Wellenfrontanalyse mit einer Skalierung von 3 mm vorliegen.

**Tabelle 18:** Vergleichsgruppen für die Analyse der Aberrationen höherer Ordnung bei Augen mit Erkrankungen der Netzhaut.

	<b>Gesamtzahl</b>	<b>subj. Refraktion</b>	<b>Wellenfrontanalyse</b>
<b>gesunde Augen</b>	60	58	53
<b>Augen mit Netzhauterkrankungen</b>	23	17	18
– davon AMD	12	8	9
– davon andere Netzhauterkrankungen	11	9	9

### Unterschiede im besten korrigierten Visus

Die Mittelwerte des BCVA in den Vergleichsgruppen zeigt Tabelle 19. Tabelle 20 enthält die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests beim Vergleich der BCVA zwischen den einzelnen Gruppen.

**Tabelle 19:** Mittelwerte des besten korrigierten Visus in Abhängigkeit von Erkrankungen der Netzhaut.

	<b>BCVA (MW <math>\pm</math> Stabw)</b>
<b>gesunde Augen (<math>n = 58</math>)</b>	1,15 $\pm$ 0,20
<b>Netzhauterkrankungen (<math>n = 17</math>)</b>	0,58 $\pm$ 0,37
– davon AMD ( $n = 8$ )	0,58 $\pm$ 0,39
– davon andere Netzhauterkrankungen ( $n = 9$ )	0,57 $\pm$ 0,37

**Tabelle 20:** Unterschiede im BCVA zwischen den Erkrankungen der Netzhaut, Signifikanzen für Mann-Whitney-U-Test.

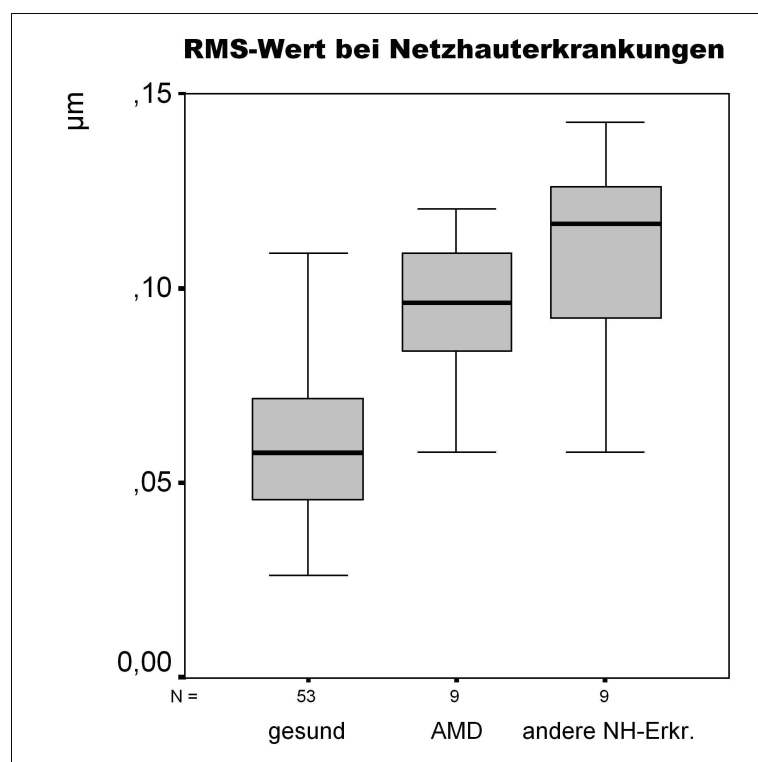
	NH-Erkrankung	AMD	and. NH-Erkr. ( <i>n</i> = 9)
gesund ( <i>n</i> = 58)	< 0,05*	< 0,05*	< 0,05*
NH-Erkrankung ( <i>n</i> = 17)			
AMD ( <i>n</i> = 8)			0,96

\* signifikanter Unterschied im BCVA.

### Unterschiede in den Ergebnissen der Wellenfrontanalyse

In Abbildung 37 ist die Verteilung des RMS-Wertes bei den Vergleichsgruppen der gesunden Augen und Augen mit Netzhauterkrankungen zu erkennen.

Die Tabellen 21 und 22 zeigen die Mittelwerte der RMS-Werte sowie die Ergebnisse der Vergleiche zwischen den einzelnen Gruppen im Mann-Whitney-U-Test.



**Abbildung 37:** Verteilung des RMS-Wertes für 53 gesunde Augen, 9 Augen mit altersabhängiger Maculadegeneration und 9 Augen mit anderen Netzhauterkrankungen (Pupillendurchmesser 3 mm).

**Tabelle 21:** Mittelwerte des RMS-Wertes in Abhängigkeit von Erkrankungen der Netzhaut.

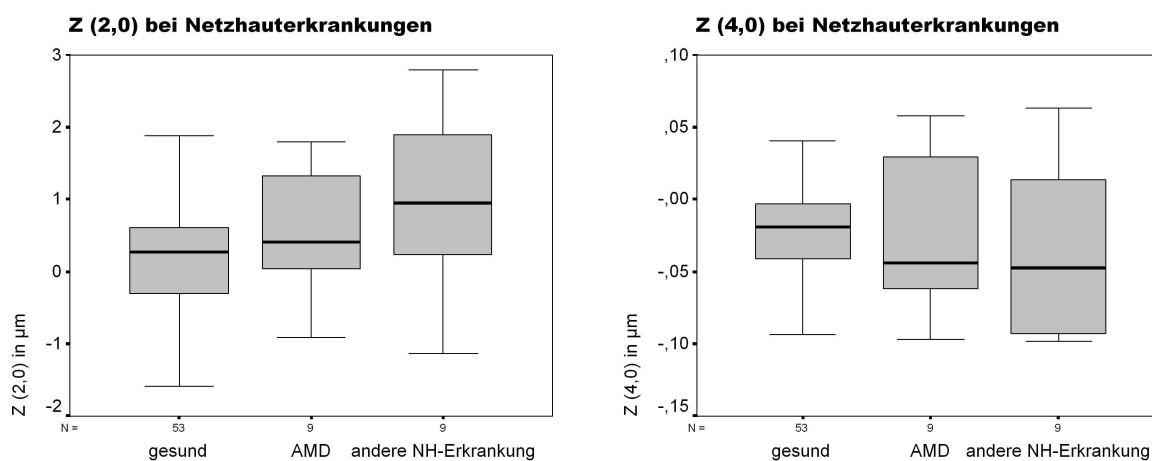
	RMS-Wert (MW $\pm$ Stabw)
<b>gesunde Augen (<math>n = 53</math>)</b>	$0,061 \pm 0,03$
<b>Netzhauterkrankungen (<math>n = 18</math>)</b>	$0,127 \pm 0,13$
– davon AMD ( $n = 9$ )	$0,095 \pm 0,02$
– davon andere Netzhauterkrankungen ( $n = 9$ )	$0,159 \pm 0,18$

**Tabelle 22:** Unterschiede im RMS-Wert zwischen den Erkrankungen der Netzhaut, Signifikanzen für Mann-Whitney-U-Test.

	NH-Erkrankung	AMD	and. NH-Erkr. ( $n = 9$ )
<b>gesund (<math>n = 53</math>)</b>	$< 0,05^*$	$< 0,05^*$	$< 0,05^*$
<b>NH-Erkrankung (<math>n = 18</math>)</b>			
<b>AMD (<math>n = 9</math>)</b>			0,354

\* signifikanter Unterschied im RMS-Wert.

Abbildung 38 zeigt die Zernike-Koeffizienten für Defokus und Öffnungsfehler im Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Netzhauterkrankungen.



**Abbildung 38:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 53 gesunde Augen, 9 Augen mit altersabhängiger Maculadegeneration und 9 Augen mit anderen Netzhauterkrankungen (Pupillendurchmesser 3 mm).

### 3.3.5.3. Erkrankungen der Hornhaut

In Tabelle 23 sind die Augen der Vergleichsgruppe mit Hornhauterkrankungen aufgeführt. Dazu zählen unter anderem Keratokonus, Keratoplastik und Hornhauterosion.

**Tabelle 23:** Vergleichsgruppen für die Analyse der Aberrationen höherer Ordnung bei Augen mit Erkrankungen der Hornhaut.

	Gesamtzahl	subj. Refraktion	Wellenfrontanalyse
gesunde Augen	60	58	53
Augen mit Hornhauterkrankungen	18	14	9

### Unterschiede im besten korrigierten Visus

Der mittlere BCVA dieser Vergleichsgruppe ist in Tabelle 24 angegeben. Der Mann-Whitney-U-Test ergibt einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) beim Vergleich des BCVA zwischen gesunden Augen und Augen mit Hornhautveränderungen.

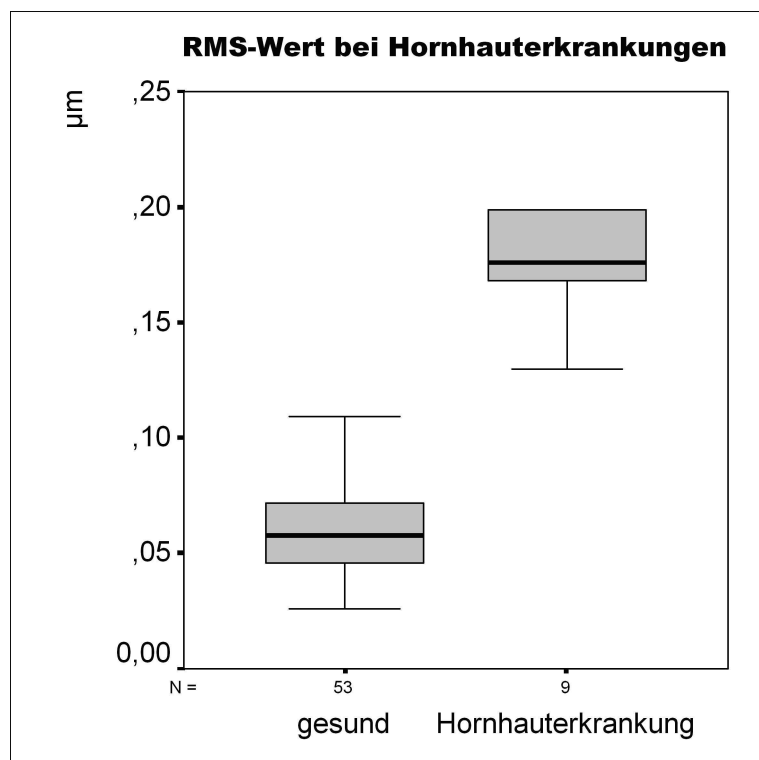
**Tabelle 24:** Mittelwerte des besten korrigierten Visus in Abhängigkeit von Erkrankungen der Hornhaut.

	bester korrigierter Visus (MW $\pm$ Stabw)
gesunde Augen ( $n = 58$ )	1,15 $\pm$ 0,20
Hornhauterkrankungen ( $n = 14$ )	0,46 $\pm$ 0,33

### Unterschiede in den Ergebnissen der Wellenfrontanalyse

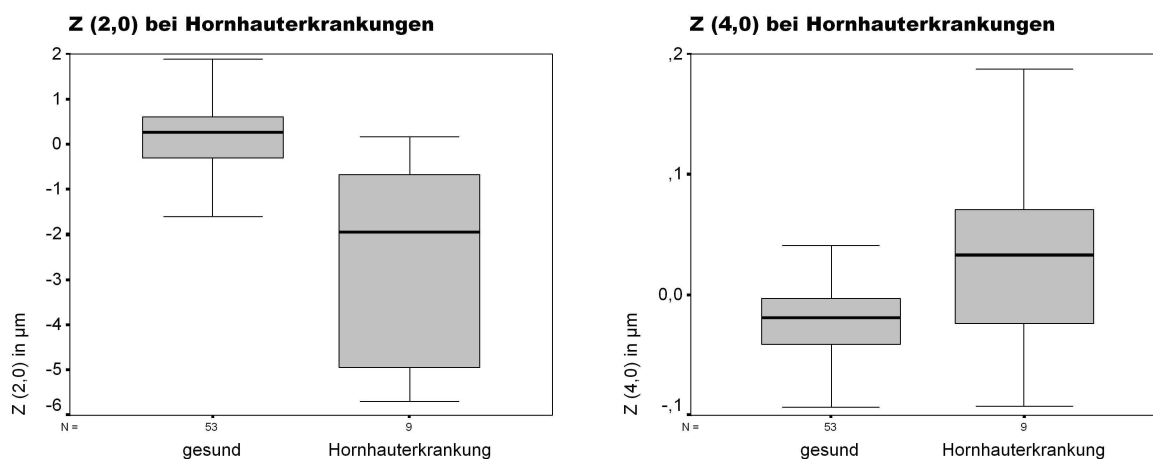
Abbildung 39 zeigt den RMS-Wert bei gesunden Augen im Vergleich zu Hornhauterkrankungen als Boxplots. Im Mann-Whitney-U-Test besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden RMS-Werten ( $p < 0,05$ ). Der Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung beträgt für gesunde Augen  $0,061 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , für Augen mit Hornhauterkrankungen  $0,226 \pm 0,16 \mu\text{m}$ .





**Abbildung 39:** Verteilung des RMS-Wertes für 53 gesunde Augen und 9 Augen mit Hornhauterkrankungen (Pupillendurchmesser 3 mm).

Abbildung 40 zeigt die Zernike-Koeffizienten für Defokus und Öffnungsfehler im Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Hornhauterkrankungen.



**Abbildung 40:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 53 gesunde Augen und 9 Augen mit Hornhauterkrankungen (Pupillendurchmesser 3 mm).

### 3.3.5.4. Glaukom

Im diesem Abschnitt werden gesunde Augen und Augen mit Glaukom verglichen. Tabelle 25 gibt einen Überblick über die Anzahl der Augen in den beiden Vergleichsgruppen.

**Tabelle 25:** Vergleichsgruppen für die Analyse der Aberrationen höherer Ordnung bei Augen mit Glaukom.

	<b>Gesamtzahl</b>	<b>subj. Refraktion</b>	<b>Wellenfrontanalyse</b>
<b>gesunde Augen</b>	60	58	53
<b>Augen mit Glaukom</b>	7	7	7

### Unterschiede im besten korrigierten Visus

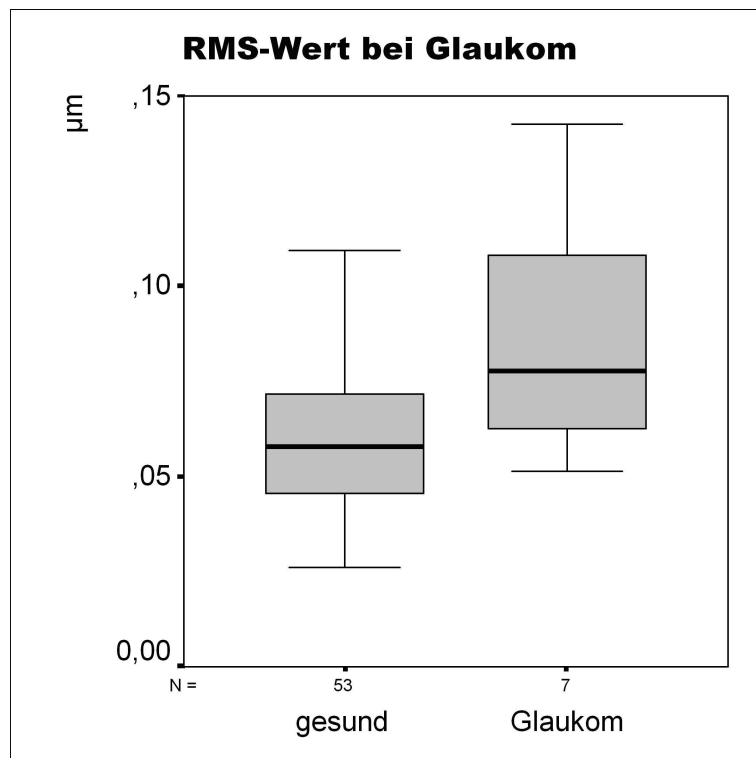
In Tabelle 26 sind die Mittelwerte der BCVA für die Gruppe der gesunden Augen und der Augen mit Glaukom wiedergegeben. Der Mann-Whitney-U-Test ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen hinsichtlich der BCVA ( $p < 0,05$ ).

**Tabelle 26:** Mittelwerte des besten korrigierten Visus bei gesunden Augen und Glaukom.

	<b>bester korrigierter Visus (MW <math>\pm</math> Stabw)</b>
<b>gesunde Augen (<math>n = 58</math>)</b>	1,15 $\pm$ 0,20
<b>Glaukom (<math>n = 7</math>)</b>	0,80 $\pm$ 0,31

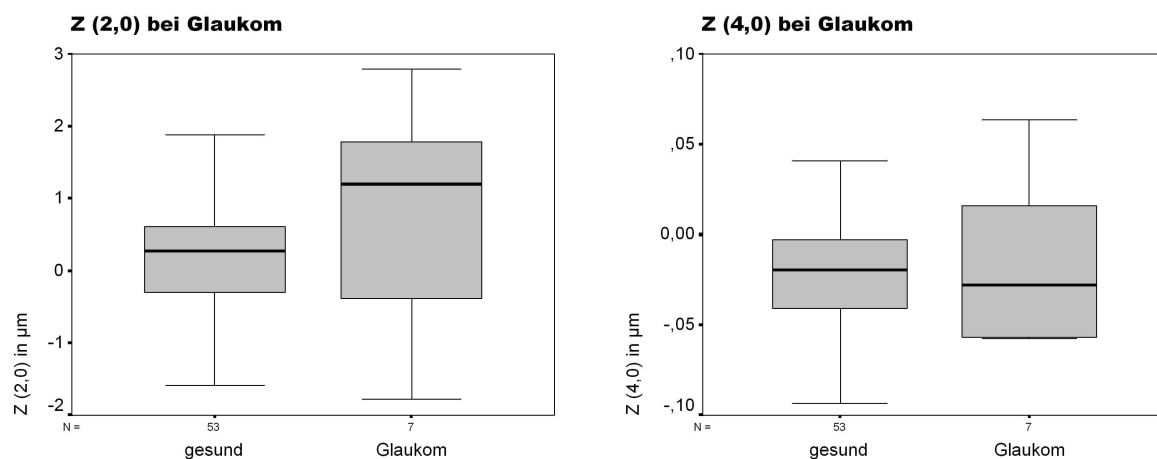
### Unterschiede in den Ergebnissen der Wellenfrontanalyse

Abbildung 41 zeigt den RMS-Wert von gesunden Augen im Vergleich zu Augen mit manifestem Glaukom. Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den RMS-Werten ( $p = 0,046$ ) im Mann-Whitney-U-Test. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung betragen für gesunde Augen  $0,061 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , für Augen mit Glaukom  $0,088 \pm 0,04 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 41:** Verteilung des RMS-Wertes für 53 gesunde Augen und 7 Augen mit einem manifesten Glaukom (Pupillendurchmesser 3 mm).

Abbildung 42 zeigt die Zernike-Koeffizienten für Defokus und Öffnungsfehler im Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Glaukom.



**Abbildung 42:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 53 gesunde Augen und 7 Augen mit einem manifesten Glaukom (Pupillendurchmesser 3 mm).

### 3.3.5.5. Amblyopie

Sechs amblyope Augen von sechs Patienten wurden mit der Gruppe der gesunden Augen verglichen. In Tabelle 27 ist die Anzahl der Augen mit den jeweiligen Messdaten zusammengefasst.

**Tabelle 27:** Vergleichsgruppen für die Analyse der Aberrationen höherer Ordnung bei amblyopen Augen.

	Gesamtzahl	subj. Refraktion	Wellenfrontanalyse
gesunde Augen	60	58	53
Augen mit Amblyopie	6	5	4

### Unterschiede im besten korrigierten Visus

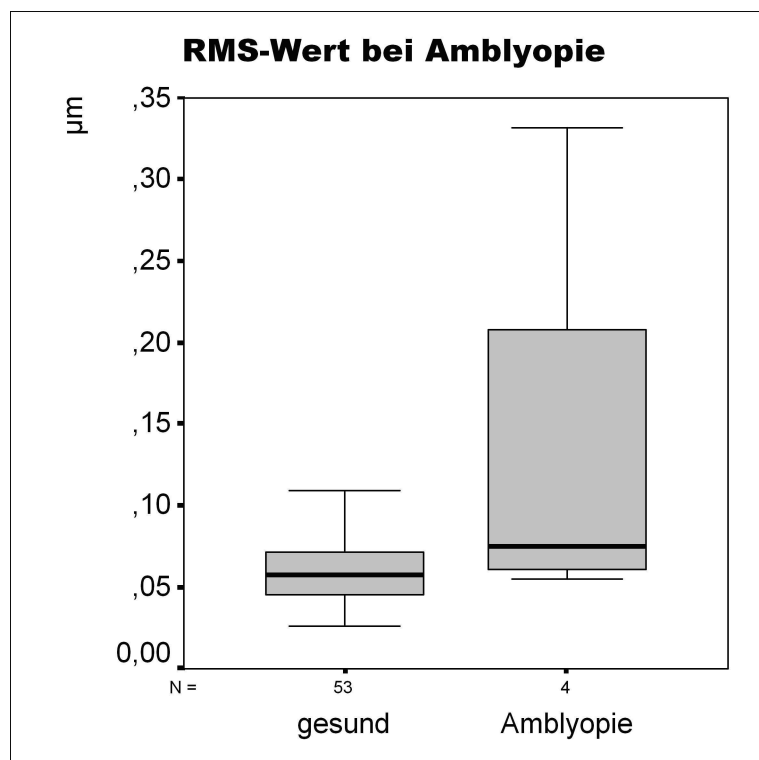
Tabelle 28 gibt die Mittelwerte der BCVA in beiden Gruppen an. Auch beim Vergleich der BCVA zwischen gesunden und amblyopen Augen lieferte der Mann-Whitney-U-Test ein signifikantes Ergebnis ( $p < 0,05$ ).

**Tabelle 28:** Mittelwerte des besten korrigierten Visus bei gesunden Augen und Amblyopie.

	bester korrigierter Visus (MW $\pm$ Stabw)
gesunde Augen ( $n = 58$ )	1,15 $\pm$ 0,20
Amblyopie ( $n = 5$ )	0,44 $\pm$ 0,24

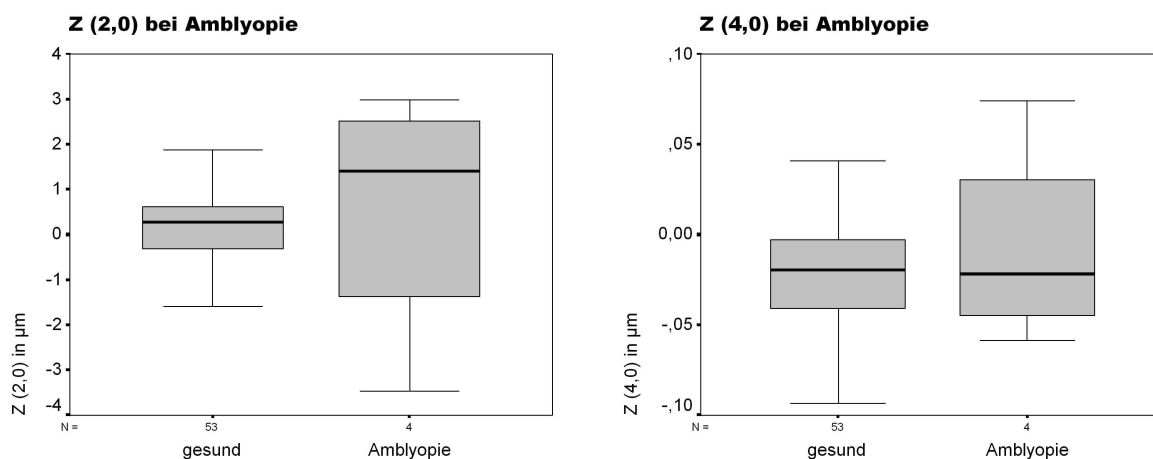
### Unterschiede in den Ergebnissen der Wellenfrontanalyse

Abbildung 43 zeigt den RMS-Wert von gesunden und amblyopen Augen. Im Mann-Whitney-U-Test besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den RMS-Werten ( $p = 0,086$ ). Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung betragen für gesunde Augen  $0,061 \pm 0,03 \mu\text{m}$ , für Augen mit Amblyopie  $0,134 \pm 0,13 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 43:** Verteilung des RMS-Wertes für 53 gesunde und 4 amblyopie Augen (Pupillendurchmesser 3 mm).

Abbildung 44 zeigt die Zernike-Koeffizienten für Defokus und Öffnungsfehler im Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Amblyopie.

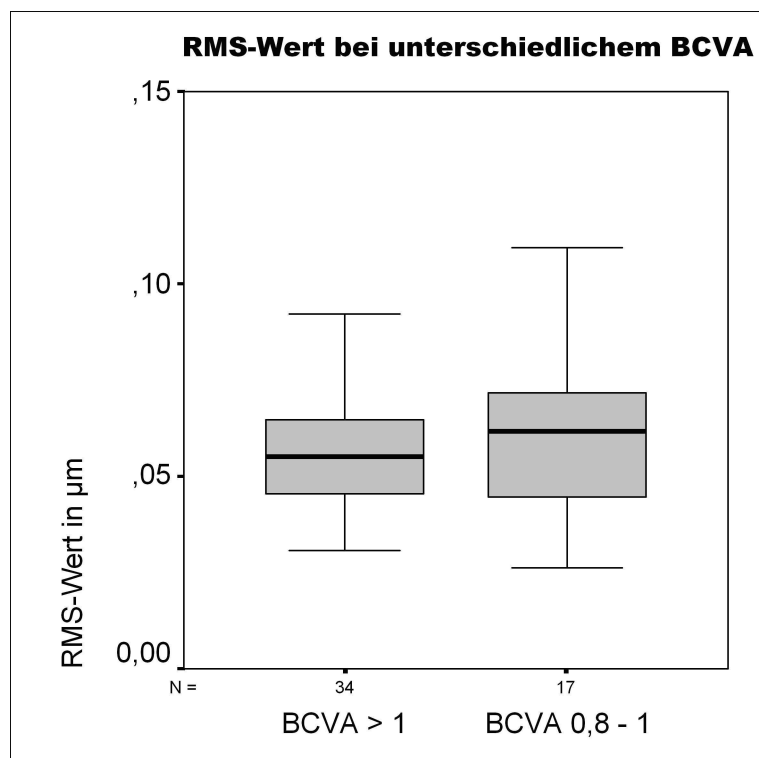


**Abbildung 44:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 53 gesunde und 4 amblyopie Augen (Pupillendurchmesser 3 mm).

### 3.3.6. Vergleiche der Zernike-Koeffizienten anhand der BCVA

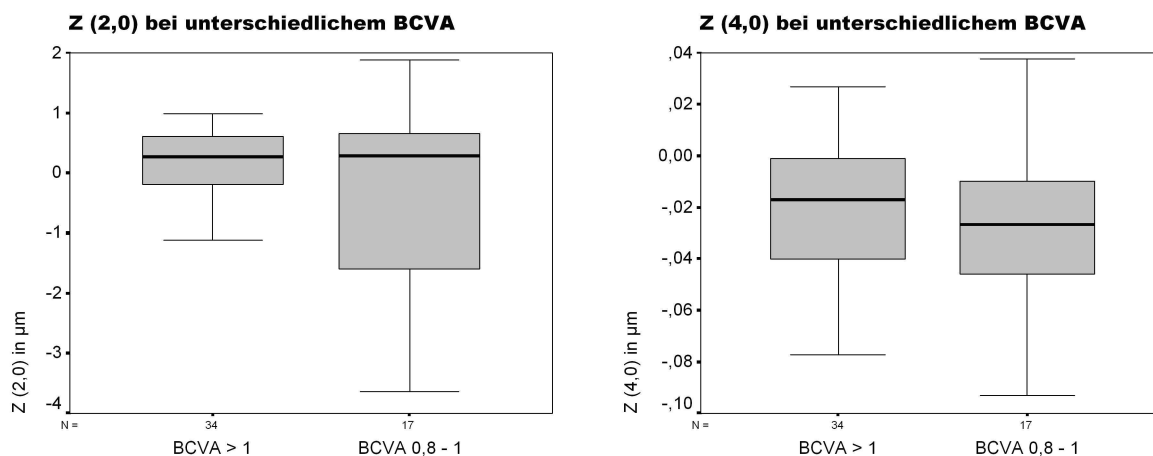
In diesem Abschnitt der Arbeit soll untersucht werden, inwieweit sich RMS-Wert bzw. einzelne Zernike-Koeffizienten zwischen gesunden Augen unterschiedlicher maximal erreichbarer Sehschärfe unterscheiden. Dazu wurde von den Probanden und Patienten ohne relevante Augenerkrankungen wiederum jeweils ein Auge ausgewählt und dieses anhand der BCVA (= *best corrected visual acuity*, bester mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbarer Visus) in die einzelnen Visusgruppen eingeteilt. Aufgrund der kleinen Anzahl der gesunden Augen in den Gruppen mit einem geringeren Visus als 0,8 werden nur jeweils die Unterschiede zwischen 34 Augen mit einem BCVA größer als 1 und 17 Augen mit einem BCVA zwischen 0,8 und 1 betrachtet.

In Abbildung 45 ist die Verteilung des RMS-Wertes in den beiden Gruppen dargestellt. Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung betragen für Visusgruppe 1 (BCVA > 1)  $0,057 \pm 0,02 \mu\text{m}$ , für Visusgruppe 2 (BCVA 0,8 – 1)  $0,067 \pm 0,04 \mu\text{m}$ . Der Mann-Whitney-U-Test ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ( $p = 0,549$ ).



**Abbildung 45:** Verteilung des RMS-Wertes für 34 Augen mit einem BCVA über 1 und 17 Augen mit einem BCVA zwischen 0,8 und 1.

Abbildung 46 stellt exemplarisch die Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für diese Visusgruppen dar. Im Mann-Whitney-U-Test ergibt sich für keinen der Zernike-Koeffizienten von der zweiten bis zur vierten Ordnung ein signifikanter Unterschied.



**Abbildung 46:** Verteilung von  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  für 34 gesunde Augen der Visusgruppe 1 und 17 Augen der Visusgruppe 2.

In Tabelle 29 sind die Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen für die Zernike-Koeffizienten anhand der Zuordnung zur Visusgruppe 1 bzw. 2 aufgeführt.

**Tabelle 29:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Zernike-Koeffizienten für 34 Augen der Visusgruppe 1 und 17 Augen der Visusgruppe 2.

Zernike-Koeffizient	MW $\pm$ Stabw Visusgruppe 1 (BCVA > 1)	MW $\pm$ Stabw Visusgruppe 2 (BCVA 0,8 – 1)
$Z_2^{-2}$	$-0,007 \pm 0,20$	$-0,066 \pm 0,49$
$Z_2^0$	$0,024 \pm 1,03$	$-0,188 \pm 1,46$
$Z_2^2$	$-0,029 \pm 0,33$	$0,108 \pm 0,96$
$Z_3^{-3}$	$-0,012 \pm 0,04$	$0,005 \pm 0,06$
$Z_3^{-1}$	$-0,006 \pm 0,06$	$-0,009 \pm 0,08$
$Z_3^1$	$-0,031 \pm 0,08$	$0,002 \pm 0,08$
$Z_3^3$	$-0,043 \pm 0,06$	$-0,066 \pm 0,14$
$Z_4^{-4}$	$0,002 \pm 0,02$	$0,013 \pm 0,03$
$Z_4^{-2}$	$0,001 \pm 0,02$	$-0,004 \pm 0,02$
$Z_4^0$	$-0,020 \pm 0,02$	$-0,025 \pm 0,03$
$Z_4^2$	$-0,004 \pm 0,03$	$-0,018 \pm 0,03$
$Z_4^4$	$-0,004 \pm 0,03$	$-0,015 \pm 0,03$

## **4. Diskussion**

### **4.1. Subjektive Refraktion**

Die subjektive Refraktion wurde auf die allgemein übliche Weise, also bei heller Beleuchtung und demzufolge kleiner Pupille durchgeführt. Der resultierende beste korrigierte Visus ist also die Sehschärfe unter photopischen Bedingungen bei enger Pupille, bei der sich die Aberrationen höherer Ordnung nur in geringem Maße bemerkbar machen. Dies muss insbesondere bei der Korrelation des BCVA mit den Aberrationen höherer Ordnung beachtet werden. Weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet sollten den mesopischen Visus nutzen und dessen Abhängigkeit von Wellenfrontaberrationen untersuchen.

Aufgrund der Zusammensetzung unserer Probanden- und Patientengruppe gestaltete sich die Refraktion bei einigen Patienten mit eingeschränkter Compliance bzw. sehr stark vermindertem Sehvermögen schwierig oder konnte nicht durchgeführt werden. Wiederum bedingt durch die heterogene Gruppe der Patienten und Probanden war die Streubreite der ermittelten Werte für Sphäre, Zylinder und BCVA außerordentlich hoch.



## **4.2. Diagnosen und Altersverteilung der Probanden und Patienten**

Der Charakter dieser Arbeit als Screening-Studie führt dazu, dass auch die Diagnosen und das Alter unserer Patienten und Probanden sehr breit gestreut sind. Aufgrund der (bewussten) Vorgehensweise, die Patienten der Poliklinik der Universitäts-Augenklinik nicht nach vorher festgelegten Kriterien auszuwählen, finden sich sehr viele verschiedene Diagnosen und kaum größere homogene Gruppen, für die eine detaillierte Auswertung möglich wäre. In folgenden Untersuchungen sollte eine sorgfältige Selektion der Studienteilnehmer erfolgen und beispielsweise bei der Katarakt zwischen den einzelnen Formen dieser Erkrankung unterschieden werden.

Dennoch ist es uns möglich, für viele – wenn auch kleinere – Gruppen einen Vergleich hinsichtlich der Aberrationen höherer Ordnung durchzuführen. Hier ist wiederum zu beachten, dass die ungleiche Altersstruktur der jeweiligen Patienten im Gegensatz zu den (augengesunden) Probanden eine potentielle Fehlerquelle darstellt. So wurde in mehreren Arbeiten gezeigt, dass sowohl die Wellenfrontaberrationen der Hornhaut allein (Guirao et al., 2000; Oshika et al., 1999) als auch des gesamten optischen Apparates des menschlichen Auges (Brunette et al., 2003; McLellan et al., 2001) vom Alter abhängen.

### 4.3. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse

Beim Vergleich unserer Ergebnisse mit denen anderer Autoren ist zu beach4ten, dass zum einen verschiedene Nomenklaturen verwendet werden (s. Abschnitt 1.2.3.), zum anderen unterschiedliche Messmethoden zum Einsatz kommen (s. Abschnitt 1.3.). Es wurde gezeigt, dass die Messungen der Wellenfrontaberrationen mittels Hartmann-Shack-Sensoren, objektivem Laser-Raytracing und subjektivem *spatially resolved refractometer* (örtlich auflösendes Refraktometer) ähnliche Ergebnisse liefern (Moreno-Barriuso et al., 2001b).

#### 4.3.1. Nicht durchführbare Messungen

Das primäre Einsatzgebiet der Wellenfrontaberrometrie liegt in der wellenfrontgesteuerten refraktiven Chirurgie. Des Weiteren wird in aktuellen Studien überprüft, inwieweit sich die Wellenfrontaberrationen als diagnostisches Mittel nutzen lassen. Der überwiegende Teil der Patienten, die für diese Anwendungen in Frage kommen, weisen weder extreme Refraktionsfehler noch eine stärkere Opazität der lichtbrechenden Medien auf.

Die wenigen Fälle, in denen eine Messung mittels WASCA in unserer Arbeit nicht möglich war, lassen sich vernachlässigen, wenn man bedenkt, dass diese weder Kandidaten für die refraktive Chirurgie wären noch Augenerkrankungen im Anfangsstadium aufwiesen, bei denen eine Wellenfrontanalyse ein wegweisendes diagnostisches Kriterium darstellen könnte.

Patienten mit extremen Myopien oder Hyperopien, die ansonsten keine Anomalitäten zeigen, könnten zur Bestimmung der Aberrationen auch mit einer entsprechenden Brille bzw. mit Kontaktlinsen vermessen werden. Allerdings liegen noch keine detaillierten Erkenntnisse über den Einfluss solcher Sehhilfen auf die Aberrationen vor.

In einer Studie über die Durchführbarkeit der Aberrometrie mittels Hartmann-Shack-Sensor wurde gezeigt, dass Veränderungen des Auges wie Keratokonus, Katarakt, trockenes Auge oder stattgehabte LASIK einen Verlust von Daten verursachen, die Messung jedoch in aller Regel trotzdem möglich ist (Thibos and Hong, 1999).

### 4.3.2. Messung von Sphäre, Zylinder und Achse mittels WASCA

Eine kürzlich veröffentlichte Studie (Salmon et al., 2003) zeigt, dass die Refraktion mit dem Hartmann-Shack-Aberrometer genau, wiederholbar und in guter Übereinstimmung mit der subjektiven Refraktion bzw. der Autorefraktion ist. Auch bei unseren Messungen konnten wir dies beobachten; jedoch soll eine genaue Analyse des Vergleiches zwischen diesen drei Methoden nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.

### 4.3.3. Verteilung der Wellenfrontaberrationen in einer gesunden Population

#### 4.3.3.1. Zernike-Koeffizienten

Von Thibos et al. wurde ein statistisches Modell der Aberrationen normaler Augen erstellt (Thibos et al., 2002b). Hier wurde gezeigt, dass die Werte der meisten Zernike-Koeffizienten mit Ausnahme des Defokus  $Z_2^0$  um den Mittelwert 0 normalverteilt sind. Unsere eigenen Messungen können diese Normalverteilung für die meisten Koeffizienten nicht bestätigen; aus diesem Grunde wurde von uns zum Vergleich der Mittelwerte auch nicht der t-Test, sondern der Mann-Whitney-U-Test verwendet, welcher im Gegensatz zu erstgenanntem statistischem Test keine Normalverteilung der Variablen voraussetzt.

Die statistische Verteilung der Wellenfrontaberrationen ist von mehreren anderen Autoren an verschiedenen Populationen detailliert untersucht worden (Wang and Koch, 2003; Castejon-Mochon et al., 2002; Porter et al., 2001). Sie kamen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass es eine breite interindividuelle Streuung der Messwerte gibt. Dies stimmt mit unseren Beobachtungen überein. Auch diese drei Forschungsgruppen benutzten eine auf einem Hartmann-Shack-Sensor beruhende Messvorrichtung.

In Tabelle 30 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Studie von Wang und Koch unseren Ergebnissen gegenübergestellt.

**Tabelle 30:** Verteilung der Zernike-Koeffizienten im Vergleich.

<b>Wang and Koch, 2003</b> (532 Augen, 306 Probanden, $d = 6,0$ mm)		<b>unsere Ergebnisse</b> (40 Augen, 40 Probanden, $d = 5,0$ mm)	
Zernike-Koeff.	(MW $\pm$ Stabw) in $\mu\text{m}$	Zernike-Koeff.	(MW $\pm$ Stabw) in $\mu\text{m}$
$Z_3^{-3}$	$-0,044 \pm 0,114$	$Z_3^{-3}$	$0,005 \pm 0,17$
$Z_3^{-1}$	$-0,055 \pm 0,142$	$Z_3^{-1}$	$-0,018 \pm 0,23$
$Z_3^1$	$0,009 \pm 0,106$	$Z_3^1$	$0,002 \pm 0,38$
$Z_3^3$	$0,020 \pm 0,095$	$Z_3^3$	$-0,117 \pm 0,29$
$Z_4^{-4}$	$0,004 \pm 0,050$	$Z_4^{-4}$	$-0,003 \pm 0,09$
$Z_4^{-2}$	$-0,001 \pm 0,036$	$Z_4^{-2}$	$-0,012 \pm 0,05$
$Z_4^0$	$0,101 \pm 0,103$	$Z_4^0$	$-0,116 \pm 0,14$
$Z_4^2$	$0,024 \pm 0,060$	$Z_4^2$	$-0,028 \pm 0,19$
$Z_4^4$	$0,027 \pm 0,052$	$Z_4^4$	$-0,030 \pm 0,09$

$d$  = Pupillendurchmesser.

Zum Unterschied der Wellenfrontaberrationen zwischen emmetropen und myopen Augen führten Collins et al. Messungen durch. Sie zeigten, dass bei einem Pupillendurchmesser von 4,5 mm die Aberrationen vierter Ordnung bei Myopie kleiner sind als bei emmetropen Probanden (Collins et al., 1995). Bei den gesunden Augen unserer Probanden konnten wir dies für einen Pupillendurchmesser von 5 mm nicht bestätigen, möglicherweise auch durch die unterschiedlichen Nomenklaturen bedingt, da in der zitierten Arbeit die weniger gebräuchlichen Taylor-Koeffizienten verwendet wurden.

#### 4.3.3.2. RMS-Werte

Wang und Koch (Wang and Koch, 2003) errechneten einen RMS-Wert der Aberrationen höherer Ordnung von  $0,305 \pm 0,095 \mu\text{m}$ . Im Gegensatz zu unserer Arbeit waren hier die Zernike-Koeffizienten dritter bis sechster Ordnung eingeschlossen; der Pupillendurchmesser betrug 6 mm. Bei 40 Augen von 40 unserer gesunden Probanden betrug der RMS-Wert  $0,206 \pm 0,11 \mu\text{m}$  für einen Pupillendurchmesser von 5 mm. Hier sind die Aberrationen dritter und vierter Ordnung enthalten.

Carkeet et al. führten eine Hartmann-Shack-Aberrometrie an 34 Kindern im Alter von ca. 6 Jahren durch (Carkeet et al., 2003). Sie erhielten bei einem Pupillendurchmesser von 5 mm einen RMS-Wert von  $0,20 \mu\text{m}$  für die Aberrationen dritter, vierter und fünfter Ordnung.

In einer anderen Arbeit (Castejon-Mochon et al., 2002) wurden die RMS-Werte der Aberrationen zweiter bis vierter (bei 3 mm) bzw. zweiter bis fünfter Ordnung (bei 4 und 5 mm Pupillendurchmesser) berechnet. Diese werden in Tabelle 31 mit unseren Ergebnissen verglichen.

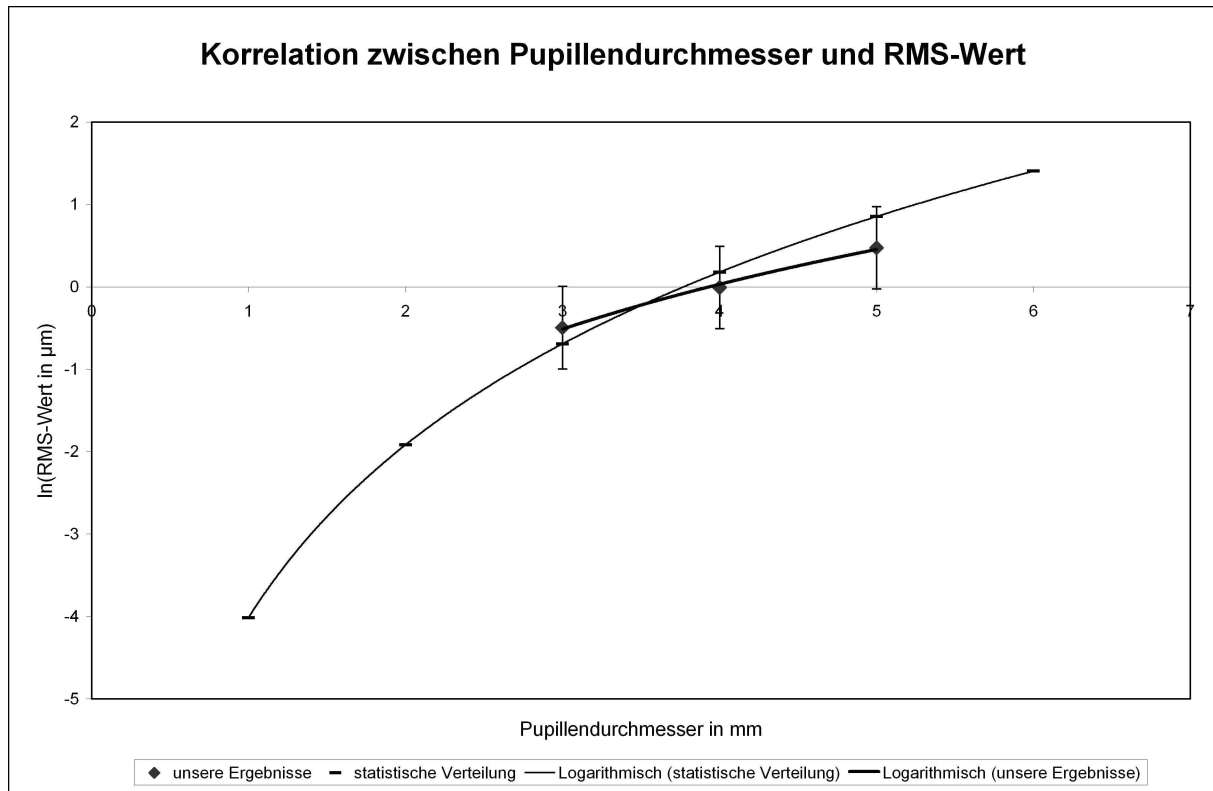
**Tabelle 31:** Mittelwert des RMS-Wertes bei unterschiedlichen Pupillendurchmessern im Vergleich.

Castejon-Mochon et al., 2002 (108 Augen, 59 Probanden)			unsere Ergebnisse (40 Augen, 40 Probanden)		
RMS- Wert bei	3 mm ( $Z_2 \dots Z_4$ )	$0,5255 \mu\text{m}$	RMS- Wert bei	3 mm ( $Z_2 \dots Z_4$ )	$0,6085 \mu\text{m}$
	4 mm ( $Z_2 \dots Z_5$ )	$1,04901 \mu\text{m}$		4 mm ( $Z_2 \dots Z_4$ )	$0,9918 \mu\text{m}$
	5 mm ( $Z_2 \dots Z_5$ )	$2,9240 \mu\text{m}$		5 mm ( $Z_2 \dots Z_4$ )	$1,6062 \mu\text{m}$

In einer Metaanalyse von sieben vorangegangenen Studien wurde gezeigt, dass der Logarithmus des RMS-Wertes normalverteilt ist (Howland, 2002). Er korreliert stark mit dem Pupillendurchmesser und folgt in etwa folgender Formel:

$$\ln(\text{RMS in } \mu\text{m}) = -1,918 + 3,023 \cdot \ln(\text{Pupillenradius in mm}) .$$

Abbildung 47 zeigt eine Kurve dieser statistischen Abhängigkeit für Pupillendurchmesser bis 6 mm und im Vergleich dazu unsere Ergebnisse. Die durchgezogenen Linien zeigen jeweils eine logarithmische Verteilung an. Die von uns bestimmten RMS-Werte scheinen tendenziell etwas niedriger zu liegen, zeigen aber keine größeren Abweichungen von den theoretischen Ergebnissen.



**Abbildung 47:** Zusammenhang zwischen RMS-Wert und Pupillendurchmesser bei unseren gesunden Probanden im Vergleich mit der Metaanalyse von Howland an 383 Probanden.

#### 4.3.3.3. Intraindividuelle Unterschiede der Wellenfrontaberrationen

Mehrere der oben genannten Autorengruppen beschreiben beim intraindividuellen Vergleich der Wellenfronten eine mehr oder weniger ausgeprägte spiegelsymmetrische Anordnung der Aberrationen. So wurde – wiederum in Übereinstimmung mit unseren eigenen Erkenntnissen – eine hohe Korrelation bei den rotationssymmetrischen Zernike-Koeffizienten  $Z_2^0$  und  $Z_4^0$  beschrieben.

Tabelle 32 zeigt einen Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen vier Studien und unseren Ergebnissen.

**Tabelle 32:** Korrelationskoeffizienten der Zernike-Koeffizienten des rechten und linken Auges im Vergleich.

	Porter et al., 2001 $n = 109$ , $d = 5,7$ mm	Wang and Koch, 2003 $n = 227$ , $d = 6,0$ mm	Castejon- Mochon et al., 2002 $n = 35$ , $d = 5$ mm	Carkeet et al., 2003 $n = 33$ , $d = 5$ mm	unsere Ergebnisse $n = 41$ , $d = 3$ mm
Zernike- koeff.	Korrelations- koeffizient	Korrelations- koeffizient	Korrelations- koeffizient	Korrelations- koeffizient	Korrelations- koeffizient
$Z_2^{-2}$	$-0,4788^*$		$-0,2$	$-0,452^*$	$-0,852^*$
$Z_2^0$	$0,9772^*$		$0,92^*$	$0,965^*$	$0,985^*$
$Z_2^2$	$0,7724^*$		$0,91^*$	$0,828^*$	$0,441^*$
$Z_3^{-3}$	$0,5365^*$	$0,633^*$	$0,63^*$	$0,699^*$	$-0,120$
$Z_3^{-1}$	$0,6856^*$	$0,677^*$	$0,65^*$	$0,496^*$	$-0,555^*$
$Z_3^1$	$-0,4345^*$	$-0,164$	$0,6^*$	$-0,136$	$0,770^*$
$Z_3^3$	$-0,3558^*$	$-0,338^*$	$-0,16$	$-0,470^*$	$0,671^*$
$Z_4^{-4}$	$-0,0963$	$-0,251^*$	$0,15$	$0,203$	$-0,030$
$Z_4^{-2}$	$-0,1551$	$-0,173$	$-0,09$	$0,050$	$-0,045$
$Z_4^0$	$0,8219^*$	$0,836^*$	$0,77^*$	$0,810^*$	$0,591^*$
$Z_4^2$	$0,5388^*$	$0,458^*$	$0,40^*$	$0,213$	$0,302$
$Z_4^4$	$0,5554^*$	$0,397^*$	$0,56^*$	$-0,081$	$0,059$

\* signifikante Korrelation.

$n$  = Anzahl der Probanden.

$d$  = Pupillendurchmesser.

Auch andere Autoren (Liang and Williams, 1997; Kelly et al., 2004) beschreiben eine Spiegelsymmetrie zwischen rechtem und linkem Auge ihrer Probanden hinsichtlich der Wellenfrontaberrationen. Die Wellenfrontmessungen der Hornhaut ergaben ebenfalls ein spiegelsymmetrisches Bild (Wang et al., 2003).

Marcos und Burns (Marcos and Burns, 2000) berechneten die Korrelation zwischen rechtem und linkem Auge von zwölf Probanden auch für den RMS-Wert. Dieser korreliert mit  $R = 0,5$  bei einem Pupillendurchmesser von 6 mm. Zur Messung der Aberrationen wurde hier ein *spatially resolved refractometer* verwendet. Bei unseren 41 Probanden ergab sich für den Vergleich der RMS-Werte der Aberrationen dritter und vierter Ordnung ein Korrelationskoeffizient von  $R = 0,668$ .

#### 4.3.4. Vergleiche der unterschiedlichen Krankheitsgruppen

##### 4.3.4.1. Erkrankungen der Linse, Pseudophakien

In verschiedenen Arbeiten wurden die Aberrationen höherer Ordnung bei Augen mit Katarakt untersucht (Kuroda et al., 2002a; Kuroda et al., 2002b). Kuroda et al. errechneten einen RMS-Wert für die Aberrationen dritter bis sechster Ordnung von  $0,658 \pm 0,255 \mu\text{m}$  für Augen mit Katarakt ( $n = 24$ ) und  $0,430 \pm 0,120 \mu\text{m}$  für die Augen einer gesunden Kontrollgruppe ( $n = 9$ ) über einen Pupillendurchmesser von 6 mm. Ebenso wie bei den Augen unserer Patienten und Probanden bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den RMS-Werten. Da unsere Messungen über einem Pupillendurchmesser von 3 mm ausgeführt wurden, sind die absoluten Werte ( $0,106 \pm 0,04 \mu\text{m}$  für 25 Augen mit Katarakt,  $0,061 \pm 0,03 \mu\text{m}$  für 53 gesunde Augen) nicht direkt miteinander vergleichbar.

Die Auswirkungen von Intraokularlinsen (IOL) auf die Aberrationen des optischen Systems des menschlichen Auges wurden von einigen Autoren untersucht (Miller et al., 2002; Atchison, 1989; Mierdel et al., 1999; Guirao et al., 2002). So wurde unter anderem gefunden, dass sich die Aberrationen von Augen nach Katarakt-Operation nicht wesentlich von denen gesunder Augen unterscheiden. Mierdel et al. (Mierdel et al., 1999) stellten lediglich eine Erhöhung des Astigmatismus bei  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  ( $Z_2^2$ ) nach Katarakt-Operation fest. Bei unseren Patienten und Probanden betrug  $Z_2^2$  für 18 Augen mit Intraokularlinsen  $0,497 \pm 0,802 \mu\text{m}$  und  $0,011 \pm 0,598 \mu\text{m}$  für 53 normale Augen. Im Mann-Whitney-U-Test ergibt sich ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,021$ ).

Miller et al. (Miller et al., 2002) stellten eine Erhöhung der sphärischen Aberration  $Z_4^0$  für Augen mit Intraokularlinsen im Vergleich mit normalen Augen fest. Der Koeffizient  $Z_4^0$  betrug bei 24 gesunden Augen mit 4 mm Pupillendurchmesser  $-0,0036 \pm 0,0385 \mu\text{m}$ ; bei 11 Augen mit IOL war der Wert signifikant erhöht auf  $0,085 \pm 0,064 \mu\text{m}$ . Bei den Augen unserer Patienten und Probanden (Pupillendurchmesser 3 mm) ergab sich eine sphärische Aberration von  $-0,021 \pm 0,0273 \mu\text{m}$  für 53 gesunde Augen und  $-0,070 \pm 0,107 \mu\text{m}$  für 18 Augen mit Pseudophakie. Im Mann-Whitney-U-Test erhält man einen signifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen ( $p = 0,004$ ). Die Tatsache, dass  $Z_4^0$  bei unseren Ergebnissen zu negativen Werten hin verschoben wird und nicht wie bei Miller et al. größer wird, kann an der Verwendung unterschiedlicher Nomenklaturen liegen (OSA-Notation in den meisten Literaturquellen, WASCA-Notation bei unseren Werten).



#### 4.3.4.2. Erkrankungen der Retina

Zu den Wellenfrontaberrationen bei Netzhauterkrankungen liegen bislang keine Studien vor. Zunächst ist festzustellen, dass es signifikante Unterschiede in der maximal erreichbaren Sehkraft beim Vergleich zwischen gesunden Augen und Augen mit Retinopathie gab. Der BCVA für Augen mit Maculadegeneration (AMD) unterscheidet sich nicht von dem bei anderen Netzhauterkrankungen erreichbaren besten korrigierten Visus.

Der signifikante Unterschied des RMS-Wertes zwischen gesunden Augen und Augen mit Netzhauterkrankungen ist am ehesten dadurch erklärbar, dass diese Patientengruppe älter als die Vergleichsgruppe war (34 bis 81 Jahre, im Mittel ca. 64 Jahre; gegenüber 15 bis 68 Jahren, im Mittel ca. 30 Jahre) und Begleiterkrankungen wie z. B. Katarakt aufwies.

Auch für den Defokus  $Z_2^0$  besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den 53 gesunden und 18 netzhauterkrankten Augen (bei erkrankten Augen höher als bei gesunden,  $p = 0,023$ ), während es einen solchen Unterschied für die sphärische Aberration  $Z_4^0$  nicht gab.

#### 4.3.4.3. Erkrankungen der Hornhaut

Zu Erkrankungen der Hornhaut gibt es bisher lediglich Erkenntnisse über die Auswirkungen eines Keratokonus bzw. einer Keratoplastik auf die Aberrationen höherer Ordnung (Schwiegerling, 1997; Langenbacher et al., 1999a; Langenbacher et al., 1999b). In allen diesen Arbeiten wurde allerdings nicht die Wellenfront des gesamten optischen Apparates, sondern lediglich mittels Videokeratometrie die Aberration der Hornhaut vermessen, wodurch sich ein Vergleich mit unseren Erkenntnissen erschwert. Schwiegerling und Langenbacher et al. beschreiben die Zerlegung der videokeratoskopischen Höhendaten in Zernike-Polynome, wodurch sich die Möglichkeit ergibt, einen Keratokonus genau zu lokalisieren bzw. im Frühstadium zu detektieren. Dabei sind Koma 0. und 1. Ordnung ( $Z_3^{-1}$  und  $Z_3^1$  bzw.  $Z_5^{-1}$  und  $Z_5^1$ ) sowie Trifoil 0. und 1. Ordnung ( $Z_3^{-3}$  und  $Z_3^3$  bzw.  $Z_5^{-3}$  und  $Z_5^3$ ) beim Keratokonus signifikant erhöht. Betrachtet man die Ergebnisse unserer Messungen an Patienten mit Keratokonus, so ergibt sich lediglich für  $Z_3^1$  (Koma 0. Ordnung) ein signifikant höherer Wert für 6 Augen mit Keratokonus im Vergleich mit 53 gesunden Augen.

Smolek und Klyce (Smolek and Klyce, 2003) korrelierten die in Zernike-Koeffizienten zerlegten Daten der Hornhauttopographie von Patienten mit Keratokonus bzw. nach Keratoplastik mit deren bestem mit Brillengläsern erreichbarem Visus und fanden einen signifikanten Zusammenhang. Jedoch reicht die Rekonstruktion einer solchen stark veränderten Hornhaut allein anhand der Zernike-Polynome nicht aus, um deren Oberfläche genau zu beschreiben.

#### **4.3.4.4. Glaukom**

Zur Wellenfrontanalyse bei Augen mit grünem Star gibt es bislang keine Literaturquellen. Auch hier lässt sich der signifikante Unterschied zwischen den RMS-Werten am ehesten durch den Altersunterschied der beiden Vergleichsgruppen (36 bis 77 Jahre, im Mittel 56 Jahre für Glaukom; 15 bis 68 Jahre, im Mittel 30 Jahre für gesunde Augen) erklären. Von den Zernike-Koeffizienten der zweiten bis vierten Ordnung existiert lediglich für  $Z_4^4$  ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen im Mann-Whitney-U-Test. In Anbetracht der geringen Anzahl der Augen mit Glaukom könnte es sich hierbei auch um einen zufälligen Effekt handeln. Im Allgemeinen würde man keinen Einfluss des grünen Stars allein auf den optischen Apparat des Auges und damit auf die Wellenfrontaberration erwarten.

#### **4.3.4.5. Amblyopie**

Auch zu den Wellenfrontaberrationen bei amblyopen Augen existieren noch keine Studien. Da es sich hier ebenfalls nicht um eine Erkrankung der lichtbrechenden Medien des Auges handelt, würde man auch für amblyope Augen keinen Unterschied in der Wellenfrontaberration zu den gesunden Augen altersgleicher Probanden erwarten. So findet sich auch in unseren Ergebnissen lediglich ein signifikanter Unterschied für die Trifoil-Aberration  $Z_3^3$ , während die anderen Zernike-Koeffizienten und der RMS-Wert in beiden Gruppen gleich sind. Gleichzeitig ist der Altersunterschied zu den gesunden Augen in der Gruppe der amblyopen Patienten am geringsten ausgeprägt (28 bis 50 Jahre, im Mittel 36 Jahre für Amblyopie; 15 bis 68 Jahre, im Mittel 30 Jahre für gesunde Augen).

#### 4.3.5. Vergleiche der Zernike-Koeffizienten anhand der BCVA

Die Auswirkungen der Aberrationen auf den besten mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbaren Visus (BCVA) wurden von verschiedenen Autoren untersucht.

Applegate et al. (Applegate et al., 2002) nutzten einen interessanten Ansatz, um den Einfluss der einzelnen Zernike-Polynome auf die Sehschärfe zu untersuchen. Sie zeigten ihren Probanden eine Sehtafel, die durch einen Zernike-Koeffizienten so verzerrt war, dass sich jeweils der gleiche RMS-Wert ergab, und prüften dann den besten mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbaren Visus. Sie fanden heraus, dass Zernike-Polynome im Zentrum der Pyramide (s. Abb. 4) wie z. B.  $Z_2^0$  die Abbildungsqualität stärker beeinträchtigen als beispielsweise die Trifoil-Aberration  $Z_3^3$ .

In einer späteren Arbeit (Applegate et al., 2003a) variierten die Autoren die Höhe des RMS-Wertes und prüften, wie stark sich der Visus bei hohem bzw. niedrigem Kontrast für die einzelnen Zernike-Koeffizienten verschlechtert. Schon ab einem RMS-Wert von  $0,05 \mu\text{m}$  war eine Abnahme des BCVA zu verzeichnen, die für Zernike-Polynome im Zentrum der Pyramide eine steiler abfallende Kurve als für Polynome weiter am Rand beschrieb. Dabei bestand eine lineare Abhängigkeit zwischen dem RMS-Wert und der Anzahl der falsch erkannten Buchstaben auf einer Sehtafel.

Eine ähnliche Herangehensweise beschrieben Applegate et al. (Applegate et al., 2003b) 2003. Jedoch wurde hier der konstante RMS-Wert von  $0,25 \mu\text{m}$  jeweils durch die Kombination von zwei Zernike-Polynomen erzeugt und die dadurch entstehende Änderung des Visus gemessen. Das Ergebnis war wiederum, dass die Änderung der BCVA stark von der Art des Zernike-Modus abhängt und dass der RMS-Wert allein kein guter Vorhersagewert für den besten erreichbaren Visus ist. Des Weiteren interagieren unterschiedliche Zernike-Polynome auf verschiedene Weise miteinander: zwei Polynome der gleichen radialen Ordnung verschlechtern die Sehschärfe mehr als Polynome der gleichen Winkelfrequenz, deren radiale Ordnung sich um 2 unterscheidet wie z. B.  $Z_2^{-2}$  und  $Z_4^{-2}$ . Eine andere Arbeitsgruppe um Applegate hatte bereits zuvor gezeigt, dass auch eine Cornea mit hohen Aberrationen den Visus in Abhängigkeit vom Pupillendurchmesser beeinträchtigen kann (Applegate et al., 2000).

Liang und Williams (Liang and Williams, 1997) führten Messungen an kleinen und großen Pupillen (3,4 vs. 7,3 mm Durchmesser) bei ihren Probanden durch und zeigten, dass sich die irregulären Aberrationen vor allem auf das Sehen mit großer Pupille auswirken. Hier fanden sie einen RMS-Wert oberhalb des Maréchal-Kriteriums (s. Abschnitt 1.2.2.). Sie berechneten, dass bei kleiner Pupille die Zernike-Aberrationen bis einschließlich vierter Ordnung korrigiert werden müssen, um eine Strehl-Zahl (s. Abschnitt 1.2.2.) von mindestens 0,8 zu erreichen; für einen großen Pupillendurchmesser ist es sogar nötig, die Zernike-Koeffizienten bis zur achten Ordnung zu eliminieren, um eine beugungsbegrenzte Optik zu erhalten.

Yoon und Williams (Yoon and Williams, 2002) korrigierten mittels einer adaptiven Optik, die auf einem deformierbaren Spiegel beruht, die Aberrationen höherer Ordnung bei ihren Probanden. Sie zeigten, dass sich die Sehschärfe verbessern lässt, wenn zusätzlich zum Defokus und Astigmatismus auch die höheren monochromatischen Aberrationen korrigiert werden; eliminiert man gleichzeitig auch die chromatische Aberration, so lässt sich der Visus noch weiter erhöhen.

Den Wert der Wellenfrontaberrationen für die Vorhersage der Sehleistung fassten Marsack et al. zusammen, indem sie konstatierten, dass die Wellenfrontanalyse weniger gut zur Erklärung interindividueller Unterschiede im Sehen dient. Jedoch ist sie gut dafür geeignet vorherzusagen, wie die Änderung der Aberrationen das Sehen des einzelnen Individuums beeinflusst (Marsack et al., 2004).

## 5. Zusammenfassung

Wir haben in unserer Screening-Studie an Patienten der ambulanten Abteilung der Klinik für Augenheilkunde des Universitätsklinikums Jena zeigen können, dass die Messung der Wellenfrontaberrationen mit dem Wavefront Analyzer einfach, schnell und reproduzierbar durchzuführen ist. Es ist möglich, unter mesopischen Bedingungen und bei unbeeinflusster Pupille die meisten Augen innerhalb weniger Sekunden zu vermessen. Ausnahmen sind Augen, deren Refraktion wie beispielsweise bei einer Aphakie außerhalb des Messbereiches des Gerätes liegt, oder Augen, deren lichtbrechende Medien wie z. B. bei fortgeschrittener Katarakt eine stark erhöhte Opazität aufweisen. Schwierigkeiten treten bei Patienten auf, die ihre Augen z. B. aufgrund eines Nystagmus nicht ruhig halten können; Probleme bereitet auch die Messung junger Probanden (hauptsächlich hyperope Menschen), die dazu neigen, während der Messung zu akkommodieren. Eine weitere Limitation stellt die unzureichende Pupillenweite vor allem älterer Patienten dar. Jedoch konnten wir bei fast allen Patienten und Probanden eine Pupillengröße von mindestens 3 mm erreichen.

In weiterführenden Untersuchungen sollten die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen noch einmal explizit überprüft werden. Die Genauigkeit der Messung von Sphäre, Zylinder und Achse mit dem Wavefront Analyzer und deren Vergleich mit anderen Formen der objektiven bzw. mit der subjektiven Refraktion ist in der Promotionsarbeit von Sandra Müller aus unserer Arbeitsgruppe bereits näher betrachtet worden. Ebenso wird die Veränderlichkeit der Aberrationen bei Messungen, die zeitlich um Stunden bis Wochen versetzt sind, untersucht, sowie die Frage geklärt, inwieweit verschiedene Mydriatika die Messergebnisse beeinflussen.

Eine weitere interessante Fragestellung wäre der Vergleich der Messwerte mittels WASCA mit Geräten, die beispielsweise auf dem Prinzip des Tscherning-Aberrometers basieren.

An 253 Augen von insgesamt 128 Studienteilnehmern konnten einige Ergebnisse aus der Literatur bestätigt werden, so zum Beispiel die breite interindividuelle Streuung der Werte der einzelnen Zernike-Koeffizienten. Auch unsere RMS-Werte entsprachen im Wesentlichen denen in verschiedenen Studien. Beim Vergleich der Aberrationen zwischen linkem und rechtem Auge von gesunden Probanden zeigten auch wir die hohe Korrelation einiger Zernike-Koeffizienten miteinander.

Die Analyse der Wellenfrontaberrationen für Augen mit verschiedenen Erkrankungen ist bisher in der Literatur auf wenige Betrachtungen beschränkt geblieben. Hier bestätigt unsere Arbeit wiederum etliche Ergebnisse. So fanden wir, dass sich die RMS-Werte bei Augen mit Katarakt signifikant von denen gesunder Augen unterscheiden und dass der Astigmatismus bei  $0^\circ$  bzw.  $90^\circ$  bei Augen mit IOL signifikant höher ist als bei gesunden Augen. Auch die sphärische Aberration  $Z_4^0$  ist bei Augen nach Katarakt-Operation höher als bei gesunden Kontrollen. Bei den übrigen von uns ausgewerteten Krankheitsgruppen gibt unsere Studie Anstöße zu weiteren Untersuchungen. So wäre es beispielsweise interessant, die Unterschiede der Wellenfronten zwischen Augen mit Multifokallinsen bzw. anderen Intraokularlinsen zu analysieren.

Einflüsse der Aberrationen höherer Ordnung auf den besten korrigierten Visus sind allein schon aufgrund der direkten Beziehung zur Anwendbarkeit der Wellenfrontanalyse für die wellenfrontgesteuerte refraktive Chirurgie bereits von mehreren Autoren betrachtet worden. Hier bestehen sicherlich die meisten Ansatzpunkte, um die von uns durchgeführte Screening-Studie auszubauen. Ein erster Schritt in diese Richtung wäre, von augengesunden Probanden den mesopischen Visus zu bestimmen und diesen mit den Aberrationen bei einer entsprechend hohen Pupillengröße zu korrelieren.

## 6. Literatur

- Altmann G (2004). Wavefront-customized intraocular lenses. *Curr Opin Ophthalmol* 15:358-364.
- Applegate R, Ballentine C, Gross H, Sarver E and Sarver C (2003a). Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error. *Optom Vis Sci* 80:97-105.
- Applegate R, Hilmantel G, Howland H, Tu E, Starck T and Zayac E (2000). Corneal first surface optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg* 16:507-514.
- Applegate R, Marsack J, Ramos R and Sarver E (2003b). Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. *J Cataract Refract Surg* 29:1487-1495.
- Applegate R, Sarver E and Khemsara V (2002). Are all aberrations equal? *J Refract Surg* 18:S556-S562.
- Applegate R, Thibos L and Hilmantel G (2001). Optics of aberroscopy and super vision. *J Cataract Refract Surg* 27:1093-1107.
- Asclepion Meditec: WASCA Wavefront Analyzer User Manual Version 2.0. Asclepion-Meditec AG (2001).
- Atchison D (1989). Third-order aberrations of pseudophakic eyes. *Ophthalmic Physiol Opt* 9:205-211.
- Babcock H (1953). The possibility of compensating astronomical seeing. *Pub Astr Soc Pac* 65:229-236.
- Bille J (2000). Preoperative simulation of outcomes using adaptive optics. *J Refract Surg* 16:S608-S610.
- Born M and Wolf E: Principles of optics. Cambridge University Press (1999).
- Brunette I, Bueno J, Parent M, Hamam H and Simonet P (2003). Monochromatic aberrations as a function of age, from childhood to advanced age. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:5438-5446.
- Büning H und Trenkler G: Nichtparametrische statistische Methoden. de Gruyter (1994).
- Campbell F and Green D (1965). Optical and retinal factors affecting visual resolution. *J Physiol (Lond)* 181:576-593.
- Campbell F and Gubisch R (1966). Optical quality of the human eye. *J Physiol (Lond)* 186:558-578.
- Carkeet A, Leo S, Khoo B and Au Eong K (2003). Modulation transfer functions in children: pupil size dependence and meridional anisotropy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:3248-3256.
- Castejon-Mochon J, Lopez-Gil N, Benito A and Artal P (2002). Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population. *Vision Res* 42:1611-1617.

- Charman W (1991). Wavefront aberration of the eye: a review. *Optom Vis Sci* 68:574-583.
- Charman W (2004). Will wavefront aberrometry become a part of routine optometric practice? *Clin Exp Optom* 87:133-135.
- Collins M, Wildsoet C and Atchison D (1995). Monochromatic aberrations and myopia. *Vision Res.* 35:1157-1163.
- Dausch D, Dausch S and Schroeder E (2003). Wavefront-supported photorefractive keratectomy: 12-month follow-up. *J Refract Surg* :405-411.
- Dick H und Kaiser S (2002). Dynamische Aberrometrie während der Akkommodation phaker Augen sowie Augen mit potenziell akkommodativer Intraokularlinse. *Ophthalmologe* 99:825-834.
- Dreher A, Bille J and Weinreb R (1989). Active optical depth resolution improvement of the laser tomographic scanner. *Appl Opt* 28:804-808.
- Fernandez E, Manzanera S, Piers P and Artal P (2002). Adaptive optics visual simulator. *J Refract Surg* 18:S634-S638.
- Gubisch R (1967). Optical performance of the human eye. *J Opt Soc Am A* 57:407-415.
- Guirao A, Redondo M and Artal P (2000). Optical aberrations of the human cornea as a function of age. *J Opt Soc Am A* 17:1697-1702.
- Guirao A, Redondo M, Geraghty E, Piers P, Norrby S and Artal P (2002). Corneal optical aberrations and retinal image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted. *Arch Ophthalmol* 120:1143-1151.
- Hartmann J (1900). Bemerkungen über den Bau und die Justirung von Spektrographen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 20:47-58.
- He J, Burns S and Marcos S (2000). Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res* 40:41-48.
- He J, Marcos S, Webb R and Burns S (1998). Measurement of the wave-front aberration of the eye by a fast psychophysical procedure. *J Opt Soc Am A* 15:2449-2456.
- Helmholtz H: *Handbuch der physiologischen Optik*. Leopold Voss, Leipzig (1867).
- Howland B and Howland H (1976). Subjective measurement of high-order aberrations of the eye. *Science* 193:580-582.
- Howland H (2000). The history and methods of ophthalmic wavefront sensing. *J Refract Surg* 16:S552-S553.
- Howland H (2002). High order wave aberration of eyes. *Ophthalmic Physiol Opt* 22: 434-439.
- Howland H and Howland B (1977). A subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am* 67:1508-1518.



- Kelly J, Mihashi T and Howland H (2004). Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye. *J Vis* 4:262-271.
- Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y and Mihashi T (2002b). Wavefront analysis in eyes with nuclear or cortical cataract. *Am J Ophthalmol* 134:1-9.
- Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y and Mihashi T (2002a). Wavefront analysis of higher-order aberrations in patients with cataract. *J Cataract Refract Surg* 28:438-444.
- Langenbucher A, Gusek-Schneider G, Kus M, Huber D und Seitz B (1999a). Keratokonius-Screening mit Wellenfrontparametern auf der Basis topographischer Hohen-daten. *Klein Monatsbl Augenheilkd* 214:217-223.
- Langenbucher A, Seitz B, Kus M and Naumann G (1999b). Zernike representation of corneal topography height data after nonmechanical penetrating keratoplasty. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 40:582-591.
- Liang J, Grimm B, Goelz S and Bille J (1994). Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am A* 11:1949-1957.
- Liang J and Williams D (1997). Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A* 14:2873-2883.
- Liang J, Williams D and Miller D (1997). Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am A* 14:2884-2892.
- Lopez-Gil N and Howland H (1999). Measurement of the eye's near infrared wavefront aberration using the objective crossed-cylinder aberroscope technique. *Vision Res* 39:2031-2037.
- MacRae S and Williams D (2001). Wavefront guided ablation. *Am J Ophthalmol* 132:915-919.
- Maeda N (2001). Wavefront technology in ophthalmology. *Curr Opin Ophthalmol* 12:294-299.
- Malacara D: Optical shop testing. Wiley, New York (1992).
- Marcos S and Burns S (2000). On the symmetry between eyes of wavefront aberration and cone directionality. *Vision Res* 40:2437-2447.
- Maréchal A (1947). Étude des effets combinés de la diffraction et des aberrations géométriques sur l'image d'un point lumineux. *Rev d'Optique* 26:257-277.
- Marsack J, Thibos L and Applegate R (2004). Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance. *J Vis* 4:322-328.
- McDonald M (2000). Summit-Autonomous CustomCornea laser in situ keratomileusis outcomes. *J Refract Surg* 16:S617-S618.
- McLellan J, Marcos S and Burns S (2001). Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42:1390-1395.

- Mierdel P, Kaemmerer M, Krinke H and Seiler T (1999). Effects of photorefractive keratectomy and cataract surgery on ocular optical errors of higher order. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 237:725-729.
- Mierdel P, Kaemmerer M, Mrochen M, Krinke H and Seiler T (2001). Ocular optical aberrometer for clinical use. *J Biomed Opt* 6:200-204.
- Mierdel P, Krinke H, Wiegand W, Kaemmerer M und Seiler T (1997). Messplatz zur Bestimmung der monochromatischen Aberration des menschlichen Auges. *Ophthalmologie* 94:441-445.
- Miller D, Williams D, Morris G and Liang J (1996). Images of cone photoreceptors in the living human eye. *Vision Res* 36:1067-1079.
- Miller J, Anwaruddin R, Straub J and Schwiegerling J (2002). Higher order aberrations in normal, dilated, intraocular lens, and laser in situ keratomileusis corneas. *J Refract Surg* 18:S579-S583.
- Molebny V, Panagopoulou S, Molebny S, Wakil Y and Pallikaris I (2000). Principles of ray tracing aberrometry. *J Refract Surg* 16:S572-S575.
- Moreno-Barriuso E, Lloves J, Marcos S, Navarro R, Llorente L and Barbero S (2001a). Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK-induced changes measured with laser ray tracing. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42:1396-1403.
- Moreno-Barriuso E, Marcos S, Navarro R and Burns S (2001b). Comparing laser ray tracing, the spatially resolved refractometer, and the Hartmann-Shack sensor to measure the ocular wave aberration. *Optom Vis Sci* 78:152-156.
- Moreno-Barriuso E and Navarro R (2000). Laser Ray Tracing versus Hartmann-Shack sensor for measuring optical aberrations in the human eye. *J Opt Soc Am A* 17:974-985.
- Mrochen M, Kaemmerer M and Seiler T (2000). Wavefront-guided laser in situ keratomileusis: early results in three eyes. *J Refract Surg* 16:116-121.
- Mrochen M, Kaemmerer M and Seiler T (2001). Clinical results of wavefront-guided laser in situ keratomileusis 3 months after surgery. *J Cataract Refract Surg* 27:201-207.
- Mrochen M und Seiler T (2001). Grundlagen der wellenfrontgeführten refraktiven Hornhautchirurgie. *Ophthalmologie* 98:703-714.
- Naseri A, McLeod S and Lietman T (2001). Evaluating the human optical system: corneal topography and wavefront analysis. *Ophthalmol Clin North Am* 14:269-273.
- Noll R (1976). Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am* 66:207-211.
- Oshika T, Klyce S, Applegate R and Howland H (1999). Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 40:1351-1355.
- Packer M, Fine I and Hoffman R (2004). Wavefront technology in cataract surgery. *Curr Opin Ophthalmol* 15:56-60.

- Pallikaris I (1998). Quality of vision in refractive surgery. Barraquer Lecture 1997. J Refract Surg 14:549-8.
- Panagopoulou S and Pallikaris I (2001). Wavefront customized ablations with the WASCA Asclepion workstation. J Refract Surg 17:S608-S612.
- Platt B and Shack R (2001). History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing. J Refract Surg 17:S573-S577.
- Porter J, Guirao A, Cox I and Williams D (2001). Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. J Opt Soc Am A 18:1793-1803.
- Preußner P (2004). Die Anwendbarkeit der Wellenfrontkorrektur in der Augenheilkunde. Klin Monatsbl Augenheilkd 221:456-463.
- Reiner J: Grundlagen der ophthalmologischen Optik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1982).
- Roorda A (2000). Adaptive optics ophthalmoscopy. J Refract Surg 16:S602-S607.
- Salmon T, West R, Gasser W and Kenmore T (2003). Measurement of refractive errors in young myopes using the COAS Shack-Hartmann aberrometer. Optom Vis Sci 80:6-14.
- Scheiner C (1619). Oculus hoc est fundamentum opticum. 1619.
- Schmitz S, Krummenauer F, Henn S and Dick H (2003). Comparison of three different technologies for pupil diameter measurement. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 241:472-477.
- Schober H, Munker H und Zolleis F (1968). Die Aberration des menschlichen Auges und ihre Messung. Optica Acta 15:47-57.
- Schober H, Wohletz J und Zolleis F (1969). Die monochromatische Aberration des menschlichen Auges. Klin Monatsbl Augenheilkd 155:243-257.
- Schwiegerling J (1997). Cone dimensions in keratoconus using Zernike polynomials. Optom Vis Sci 74:963-969.
- Schwiegerling J (2000). Theoretical limits to visual performance. Surv Ophthalmol. 45:139-146.
- Seiler T, Iseli H, Hafezi F und Mrochen M (2003). Supernormales Sehvermögen. Dtsch Arztebl 100:A700-A704.
- Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P and Krinke H (2000). Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. Arch Ophthalmol 118:17-21.
- Shack RV and Platt BC (1961). Production and use of a lenticular Hartmann screen. J Opt Soc Am 1971. 656.
- Smirnov M (1961). Measurement of the wave aberration of the human eye. Biofizika 6:776-795.

- Smolek M and Klyce S (2003). Zernike polynomial fitting fails to represent all visually significant corneal aberrations. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44:4676-4681.
- Stevens J und Sekundo W (2003). Wellenfrontanalyse und adaptive Optiken. *Ophthalmologie* 100:593-601.
- Thibos L (2000). Principles of Hartmann-Shack aberrometry. *J Refract Surg.* 16:S563-S565.
- Thibos L (2001). Wavefront data reporting and terminology. *J Refract Surg.* 17:S578-S583.
- Thibos L, Applegate R, Schwiegerling J and Webb R (2002a). Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg* 18:S652-S660.
- Thibos L and Bradley A (1997). Use of liquid-crystal adaptive-optics to alter the refractive state of the eye. *Optom Vis Sci* 74:581-587.
- Thibos L, Bradley A and Hong X (2002b). A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes. *Ophthalmic Physiol Opt* 22:427-433.
- Thibos L and Hong X (1999). Clinical applications of the Shack-Hartmann aberrometer. *Optom Vis Sci* 76:817-825.
- Tscherning M (1894). Die monochromatischen Aberrationen des menschlichen Auges. *Z Psychol Physiol Sinne* 6:456-471.
- Walsh G and Charman W (1985). Measurement of the axial wavefront aberration of the human eye. *Ophthalmic Physiol Opt.* 5:23-31.
- Walsh G, Charman W and Howland H (1984). Objective technique for the determination of monochromatic aberrations of the human eye. *J Opt Soc Am A* 1:987-992.
- Walsh G and Cox M (1995). A new computerised video-aberroscope for the determination of the aberration of the human eye. *Ophthalmic Physiol Opt* 15:403-408.
- Wang L, Dai E, Koch D and Nathoo A (2003). Optical aberrations of the human anterior cornea. *J Cataract Refract Surg* 29:1514-1521.
- Wang L and Koch D (2003). Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 29:1896-1903.
- Webb R, Penney C, Sobiech J, Staver P and Burns S (2003). SSR (spatially resolved refractometer): a null-seeking aberrometer. *Appl Opt* 42:736-744.
- Webb R, Penney C and Thompson K (1992). Measurement of ocular local wavefront distortion with a spatially resolved refractometer. *Appl Opt* 31:3678-3686.
- Wesemann W (2004). Optische und physiologische Grenzen der wellenfrontgesteuerten Hornhautchirurgie. *Ophthalmologie* 101:521-536.
- Yoon G and Williams D (2002). Visual performance after correcting the monochromatic and chromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am A* 19:266-275.

## Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Professor Dr. med. J. Strobel für die Vergabe des Themas und die intensive und geduldige Unterstützung dieser Dissertation.

Großen Dank schulde ich weiterhin den Mitarbeitern der Carl Zeiss Meditec AG für die Einführung in die Benutzung des *WASCA Analyzers* und die fortwährende Hilfe bei der Beantwortung jeglicher technischer Fragen. Für die Beratung hinsichtlich der statistischen Auswertung bedanke ich mich recht herzlich bei Frau Dr. Hoyer vom Institut für Medizinische Statistik und Informatik. Meiner Studienkollegin Sandra Müller möchte ich sehr für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Messungen und die Hilfe bei deren Organisation danken.

Meinem Ehemann, Dipl.-Math. Thomas Schneider, danke ich nicht nur für die Erklärung der obskureren Details der physikalischen und mathematischen Grundlagen, die akribische Bearbeitung der technischen Abbildungen mit *MetaPost* und den Textsatz mit  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ , sondern vor allem auch für die ausdauernde moralische Unterstützung während der Schreibphase.

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Prof. Dr. med. habil. J. Strobel, Mitarbeiter der Carl Zeiss Meditec AG, Sandra Müller, Dipl.-Math. Thomas Schneider, Frau Dr. Hoyer,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, 23.05.2005

# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Name: Renate Stein  
 Geburtsdatum, -ort: 13. 03. 1977, Mühlhausen / Thür.  
 Adresse: Brändströmstr. 2, 07749 Jena  
 Familienstand: verheiratet

## Schulbildung:

1983–1991 POS „Hans Beimler“, Mühlhausen  
 1991–1995 Abiturstufe im Spezialschulteil  
 mathematisch-naturwissenschaftlicher Richtung  
 am Albert-Schweitzer-Gymnasium, Erfurt  
 20. 06. 1995 Abitur

## Auslandsaufenthalt:

Juli 1995 – Juli 1996 Arbeit als Au pair in London

## Hochschulbildung mit Auslandsstudium:

01.10.1996 Immatrikulation an der Friedrich-Schiller-Universität Jena,  
 Studiengang Humanmedizin  
 August 1999 – Juli 2000 Medizinstudium an der University of Aberdeen als  
*fifth year MB ChB student*  
 Oktober 2002 – September 2003 Praktisches Jahr  
 06. 11. 2003 Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

## Berufstätigkeit:

01. 02. 2004 – 30. 09. 2004 Ärztin im Praktikum an der Klinik für Urologie,  
 Friedrich-Schiller-Universität Jena  
 seit 01. 10. 2004 Assistenzärztin an der Klinik für Urologie,  
 Friedrich-Schiller-Universität Jena

Jena, 23. 05. 2005

## A. Anhang

### A.1. Alter, Geschlecht, Diagnosen, Zuordnung zu Vergleichsgruppen und Ergebnisse der subjektiven Refraktion

ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
AD112007od	27	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2,75	1	0	-2,25
AD112007os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-3,25	1	0	-2,75
AL514111OD	20	w	1	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,5	3	-3,5	4	90	-1,5
AL514111OS			1	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,5	3	-3,25	3	85	-1,75
AM147946od	69	w	1	2	IOL	AMD		2	3	1	1	9	9	9	1	2	-2	2	36	-1
AM147946os			2	2	IOL	AMD		2	3	1	1	9	9	9	0,9	2	1,25	0,25	45	1,375
AN284390od	50	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	1	15	0,5
AN284390os			2	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,05	4	1	1	6	1,5
AN755916od	26	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,9	2	-1,75	0,75	93	-1,375
AN755916os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	-1,25	0,25	95	-1,125
AZ604038od	29	w																		
AZ604038os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,8	2	-4,25	4,25	164	-2,125
BA032767od	50	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,5	0,5	170	-0,25
BA032767os			0	1	Z.n. Astvenenverschluss			9	9	9	9	9	9	9	1	2	-0,75	0,5	10	-0,5
BA186031od	60	m	2	3	Katarakt	Glaukom	AMD	1	1	1	1	9	1	9	1	2	2	0,5	75	2,25
BA186031os			2	2	Katarakt	Glaukom		1	1	9	9	9	1	9	0,8	2	1,75	0,25	110	1,875
BA211717od	31	w	2	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,4	3	2	0,25	30	2,125
BA211717os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	2,5	0,5	140	2,75
BA540126OD	42	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,25	0		0,25
BA540126OS			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,25	0		0,25
BA564995od	24	w		0				0	0	0	0	0	0	0						
BA564995os				0				0	0	0	0	0	0	0						
BE110672od	63	w	1	1	Keratoplastik			9	9	9	9	1	9	9	0,3	4	-5,75	3	135	-4,25
BE110672os																				
BE139861od	30	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-4,25	0,5	100	-4
BE139861os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-3,25	0,5	95	-3
BE529561od	17	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
BE529561os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
BI607204od	33	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,7	3	-10	6	110	-7
BI607204os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,4	3	-7,5	4,5	65	-5,25
BO496552od	24	w		0				0	0	0	0	0	0	0						
BO496552os				0				0	0	0	0	0	0	0						
BU350077od	70	w	0	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0,5	0		0,5
BU350077os				2	Keratoplastik	Aphakie		9	9	9	9	1	9	9						
BU732171od	73	w	1	2	Katarakt	HH-Veränderungen		1	1	9	9	1	9	9	0,4	3	-11,75	2	15	-10,75
BU732171os			1	2	IOL	HH-Veränderungen		2	3	9	9	1	9	9	1	2	-3,5	2,75	10	-2,125
CA227646OD	28	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0,8	2	0	0		0
CA227646OS				1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1						
DA226649od	34	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,9	2	-9,25	0		-9,25
DA226649os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-9	0		-9



ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
Do721348od	36	m		2	1	Keratokonus		9	9	9	9	1	9	9	0,4	3	-1	3,5	178	0,75
DO721348os			1		1	Keratoplastik		9	9	9	9	1	9	9	0,5	3	-2,5	2,5	2	-1,25
DO830916od	36	w		1	1	Glaukom		9	9	9	9	9	1	9	0,63	3	-4	0,25	120	-3,875
DO830916os			1		1	Glaukom		9	9	9	9	9	1	9	0,63	3	-4,25	0,5	80	-4
EC290378OD	27	m		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,25	0		-1,25
EC290378OS			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,5	0		-1,5
ED563187OD	80	w		2	1	Katarakt		1	1	9	9	9	9	9	0,3	4	1,5	0		1,5
ED563187OS			2		1	Katarakt		1	1	9	9	9	9	9	0,3	4	1,5	0		1,5
EH709364od	80	w			2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9						
EH709364os			2		2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9	0,5	3	1,5	0,5	90	1,75
EI214795od	50	m		1	1	Katarakt		1	1	9	9	9	9	9	1	2	-4	0,75	175	-3,625
EI214795os			2		3	IOL	Z.n. Amotio retinae	2	3	1	2	9	1	9	0,3	4	4	0,5	90	4,25
FR405313OD	27	m		2	1	Uveitis		9	9	9	9	9	9	9	1	2	0,5	0,5	70	0,75
FR405313OS					1	Z.n. Iritis		9	9	9	9	9	9	9						
FR808977od	23	w		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	-0,75	0		-0,75
FR808977os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,4	1	-0,75	0		-0,75
FU708354od	75	m			3	IOL	Amotio retinae	2	3	1	1	9	9	9						
FU708354OS				0	3	IOL	diabet. Retinopathie	2	3	1	1	9	9	9	0,2	4	-1,5	2	0	-0,5
FU997989od	25	w		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1	0		-1
FU997989os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2,25	0,25	75	-2,125
GE316385od	66	w			1	Katarakt		1	1	9	9	9	9	9						
GE316385os			2		1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	0,8	2	0	2	118	1
GE426515od	74	w		1	1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	1	2	-2,25	1	1	-1,75
GE426515os			2		1	Aphakie		9	9	9	9	9	9	9	0,4	3	10	0		10
GO204868od	72	w		1	2	IOL	AMD	2	3	1	1	9	9	9	0,05	4	-4	1	0	-3,5
GO204868os			1		2	IOL	AMD	2	3	1	1	9	9	9	0,4	3	-4,5	0,75	40	-4,125
GR283990od	23	w		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2	0		-2
GR283990os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2	0,25	60	-1,875
GR480213od	66	w		1	1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	0,5	3	-2,5	0		-2,5
GR480213os			1		1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	0,8	2	-3	0		-3
GR915594od	35	w		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1	2	-3,5	0		-3,5
GR915594os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1	2	-4	0		-4
GU845209od	26	w		1	0			0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	-0,75	0		-0,75
GU845209os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	-0,75	0		-0,75
GU926999od	70	m		0	2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9	0,16	4	0	0		0
GU926999os			0		2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9	1	2	-0,25	0,5	85	0
HA332318od	36	w		0	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
HA332318os				0	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
HA574691od	34	m		1	1	Keratokonus		9	9	9	9	1	9	9	0,63	3	-12,5	0,5	175	-12,25
HA574691os			1		1	Keratokonus		9	9	9	9	1	9	9	0,4	3	-13,5	0,5	175	-13,25
HE192698od	88	m		1	1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	0,8	2	-1,5	0,5	150	-1,25
HE192698os			1		1	IOL		2	3	9	9	9	9	9	0,8	2	-1,5	0,5	150	-1,25
HE201526od	57	w		0	1	MFL		2	2	9	9	9	9	9	0,8	2	-0,25	1	75	0,25
HE201526os				0	1	MFL		2	2	9	9	9	9	9	1	2	-0,25	1	65	0,25
HE357217od	24	w		0	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0,25	80	0,125
HE357217os				0	0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0,25	90	0,125
HE478927od	77	m		0	2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9	0,63	3	-0,25	0,5	0	0
HE478927os					2	Katarakt	AMD	1	1	1	1	9	9	9						
HE744676od	25	m		1	1	Keratokonus		9	9	9	9	1	9	9	0,25	4	-13	5	95	-10,5
HE744676os			1		0			0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,25	0,5	90	-1
HI423082od	61	w		2	1	Katarakt		1	1	9	9	9	9	9	1	2	0,75	0,5	10	

ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
HI423082os			2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1	2	0,75	0,75	175	1,125
HO193563od	81	w	2	2	IOL	Keratoplastik		2	3	9	9	1	9	9	0,1	4	2	1	10	2,5
HO193563OS			2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,63	3	4,25	0,75	5	4,625
HU623219od	55	w	1	3	Katarakt	ICL	Z.n. Netzhautloch	1	1	1	2	9	9	9	0,6	3	-1,25	0,5	10	-1
HU623219os			1	2	Katarakt	ICL		1	1	9	9	9	9	9	0	4	-1,25	0,25	75	-1,125
HU894401od	19	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,75	0,25	10	-1,625
HU894401os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,8	2	-1,75	0		-1,75
JE844003od	24	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-0,25	0		-0,25
JE844003os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	-0,25	0,25	176	-0,125
JU254589od	24	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-3,75	0		-3,75
JU254589os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-3,75	0		-3,75
JU257086od	28	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2,25	0,5	70	-2
JU257086os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-3	1	90	-2,5
KA373246OD	55	w	2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,25	4	1	0		1
KA373246OS			0	2	IOL	Keratitis		2	3	9	9	1	9	9	0,63	3	-0,5	0,5	60	-0,25
KA377407od	36	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,25	0		-0,25
KA377407os			0	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,63	3	0	0,75	155	0,375
KA441033od	51	w	0	1	IOL			2	3	9	9	9	9	9	1,25	1	-0,5	0		-0,5
KA441033os			0	1	IOL			2	3	9	9	9	9	9	1,25	1	-0,25	0		-0,25
KA504932od	29	m		2	Katarakt	HH-Degeneration		1	1	9	9	1	9	9						
KA504932os				2	Katarakt	Keratoplastik		1	1	9	9	1	9	9						
KA677881OD	75	m	0	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0,5	0		0,5
KA677881OS			0	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,9	2	0,25	0		0,25
KI798099OD	18	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
KI798099OS			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
KI943338od	25	w	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-0,25	3	15	1,25
KI943338os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	0,8	2	-0,75	3,5	125	1
KO217752od	34	m	2	1	Retinoschisis			9	9	1	2	9	9	9	0,8	2	1,5	0,25	120	1,625
KO217752os			2	1	Retinoschisis			9	9	1	2	9	9	9	1	2	0,5	0,75	80	0,875
KO605241od	67	w	2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0,75	0,75	0	1,125
KO605241os			0	1	MFL			2	2	9	9	9	9	9	1,25	1	-0,5	0,75	40	-0,125
KR046873od	74	w		2	Katarakt	AMD		1	1	1	1	9	9	9						
KR046873os			2	2	Katarakt	AMD		1	1	1	1	9	9	9	1	2	1,25	0,25	0	1,375
KR069752od	44	m	0	1	Retinopathia solaris			9	9	1	2	9	9	9	1,25	1	0	0		0
KR069752os			0	1	Retinopathia solaris			9	9	1	2	9	9	9	1,25	1	0	0		0
KR323211od	58	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
KR323211os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	0,25	1	167	0,75
KU051750od	77	m	2	1	Glaukom			9	9	9	9	9	1	9	1,25	1	1,75	1	172	2,25
KU051750os			2	1	Glaukom			9	9	9	9	9	1	9	0,4	3	2	0,5	11	2,25
LA794914OD	77	w	2	3	Katarakt	diabet. Retinopathie	Maculaödem	1	1	1	2	9	9	9	0,2	4	2	0,75	15	2,375
LA794914OS			2	3	Katarakt	diabet. Retinopathie	ischäm. Maculopathie	1	1	1	2	9	9	9	0,05	4	2,5	0,5	175	2,75
LE186033od	23	m	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	4,5	0		4,5
LE186033os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	4	0,5	75	4,25
LI026591od	22	w	0	1	asympt. Papillenexkavation			9	9	9	9	9	9	9	1,25	1	0	0		0
LI026591os			0	1	asympt. Papillenexkavation			9	9	9	9	9	9	9	1,25	1	0	0		0
LI225381OD	45	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
LI225381os																				
LI619718od	19	m	0	1	Uveitis			9	9	9	9	9	9	9	0,4	3	-0,25	0,5	90	0
LI619718os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,5	0,75	85	-0,125
LU837792od	42	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,32	4	-21	0		-21
LU837792os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	0,32	4	-20	0		-20

ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
MA587838od	56	m		3	Glaukom	Keratoplastik	Keratitis	9	9	9	9	9	1	1	9					
MA587838os			2	1	Glaukom			9	9	9	9	9	1	9	0,8	2	1,75	0		1,75
ME239181od	61	m	0	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,5	3	0,5	0		0,5
ME239181os			0	1	MFL			2	2	9	9	9	9	9	1,25	1	-0,25	0,5	10	0
ME473094od	46	w	1	1	Glaukom			9	9	9	9	9	1	9	1	2	-3,75	1	141	-3,25
ME473094os			1	2	Glaukom	Zentralvenenthrombose		9	9	9	9	9	1	9	0,9	2	-4,5	0,75	130	-4,125
MU095181od	23	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,6	1	-6	0,5	80	-5,75
MU095181os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-5,5	0		-5,5
MU096042od	49	m	2	3	Keratoplastik	Aphakie	Z.n. Iridektomie	9	9	9	9	1	9	9	0,2	4	4,25	10,5	113	9,5
MU096042os			2	3	Keratoplastik	Aphakie	Z.n. Iridektomie	9	9	9	9	1	9	9	0,2	4	9	5,25	106	11,625
MU634865od	23	w	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	0,25	0,75	68	0,625
MU634865os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,2	1	0,25	1	110	0,75
PA953782od	23	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
PA953782os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
PE522314od	27	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,75	0,25	100	-0,625
PE522314os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1	0,25	80	-0,875
PF945972od	20	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,5	0,25	0	-0,375
PF945972os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,25	0,25	75	-0,125
PF947734od	46	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	0,25	0,25	105	0,375
PF947734os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	0,25	0,25	25	0,375
PI499222od	61	m	0	1	MFL			2	2	9	9	9	9	9	0,8	2	0	0,5	60	0,25
PI499222os			1	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,5	3	-2	0		-2
PO115925od	15	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,25	0,5	90	0,5
PO115925os			1	1	Amblyopie			9	9	9	9	9	9	1	0,63	3	-7,5	1,75	90	-6,625
PU656157od	46	w		3	IOL	diabet. Retinopathie	Z.n. Amotio retinae	2	3	1	2	9	9	9						
PU656157os				1	diabet. Retinopathie			9	9	1	2	9	9	9						
RE065709od	33	m	1	1	Keratokonius			9	9	9	9	1	9	9	0,5	3	-13	1,5	120	-12,25
RE065709os			1	1	Keratokonius			9	9	9	9	1	9	9	0,2	4	-13	2,5	30	-11,75
RE623462od	81	m	2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0,5	0,5	90	0,75
RE623462os			2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1	2	1	0		1
RI250036od	23	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-1	1	80	-0,5
RI250036os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-1	1,75	95	-0,125
RO413222od	53	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0		0
RO413222os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0		0
RO651419od	45	w	1	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,4	3	-5	1	105	-4,5
RO651419os			1	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,7	3	-1,25	0		-1,25
RU267995od	22	w		1	asympt. Papillenexkavation			9	9	9	9	9	9	9						
RU267995os				1	asympt. Papillenexkavation			9	9	9	9	9	9	9						
SA004309od	69	w	2	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,9	2	2	0		2
SA004309os			2	2	IOL	Keratoplastik		2	3	9	9	1	9	9	0,1	4	2,25	0		2,25
SC019341OD	18	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0,5	21	0,25
SC019341OS			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0	0		0
SC083847OD	31	m	0	1	Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0	0		0
SC083847OS			1	1	MFL			2	2	9	9	9	9	9	0,63	3	-2	1,25	0	-1,375
SC110335od	75	w		2	IOL	diabet. Retinopathie		2	3	1	2	9	9	9						
SC110335os				2	IOL	diabet. Retinopathie		2	3	1	2	9	9	9						
SC111608od	72	m	1	1	IOL			2	3	9	9	9	9	9	1	2	-4	3,75	30	-2,125
SC111608os			1	2	IOL	HH-Infiltrat/-erosion		2	3	9	9	1	9	9	1	2	-4	1,75	175	-3,125
SC280880od	25	m	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,5	0,25	115	0,625
SC280880os			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,5	0,75	90	0,875
SC917856od	29	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2,25	1,75	15	-1,375

ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
SC917856os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2,25	1,75	154	-1,375
SE495728od	24	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,6	1	-1,25	0,5	159	-1
SE495728os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,5	0,75	171	-1,125
SP647235od	27	w	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-0,5	0,75	15	-0,125
SP647235os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,75	0,75	170	-0,375
SP671642od	58	m			1 MFL			2	2	9	9	9	9	9						
SP671642os					1 MFL			2	2	9	9	9	9	9						
ST270839OD	64	w	2		2 Katarakt	GF-Defekt		1	1	9	9	9	9	9	1	2	0,25	1	87	0,75
ST270839OS			0		2 Katarakt	GF-Defekt		1	1	9	9	9	9	9	1,25	1	0	0,5	114	0,25
ST274777OD	54	w	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	1,25	0,5	90	1,5
ST274777OS			2	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	1,5	0,25	90	1,625
ST314289od	24	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-4,25	0,5	15	-4
ST314289os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-4,25	0,5	165	-4
ST316587OD	32	w	1	1	1 HH-Gefäße			9	9	9	9	1	9	9	0,8	2	-9	2	90	-8
ST316587OS			1	1	1 HH-Gefäße			9	9	9	9	1	9	9	0,8	2	-9	1,5	85	-8,25
ST415248od	78	w	0	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,5	3	0,5	0		0,5
ST415248os				3	1 IOL	AMD	Z.n. HH-Verletzung	2	3	1	1	1	9	9						
ST478523OD	67	m	2	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1	2	1,5	0,75	0	1,875
ST478523OS			2	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1	2	2	0,5	0	2,25
ST630910od	24	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1	0,5	30	-0,75
ST630910os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,75	0,75	150	-1,375
SZ782469od	23	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,75	0		-0,75
SZ782469os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1	0,25	65	-0,875
TA517591od	73	w	2	3	2 Katarakt	diabet. Retinopathie	Maculaödem	1	1	1	2	9	9	9	0,5	3	2,5	0,75	150	2,875
TA517591os			2	2	2 Katarakt	diabet. Retinopathie		1	1	1	2	9	9	9	0,8	2	2,75	0,5	35	3
TH311582od	81	m	2	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1,25	1	2	0,5	92	2,25
TH311582os			2	2	2 Katarakt	AMD		1	1	1	1	9	9	9	0,16	4	1,75	0,5	87	2
TH553416od	74	w		2	2 IOL	AMD		2	3	1	1	9	9	9						
TH553416os				2	2 IOL	AMD		2	3	1	1	9	9	9						
TR345212od	20	w	0	1	1 Uveitis			9	9	9	9	9	9	9	0,8	2	-0,75	0,5	75	-0,5
TR345212os			0	1	1 Uveitis			9	9	9	9	9	9	9	1	2	-0,75	0,5	90	-0,5
VA276733od	68	m	2	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,5	0,75	0	0,875
VA276733os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	0,25	0,5	25	0,5
VO323688od	38	w	1	1	1 HH-Veränderungen			9	9	9	9	1	9	9	0,8	2	-2	1,5	0	-1,25
VO323688os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-1,75	0		-1,75
VO328285od	38	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,6	1	0	0,25	80	0,125
VO328285os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,6	1	0	0,5	80	0,25
VO660698od	25	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-2	0,75	95	-1,625
VO660698os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-3	0,75	80	-2,625
WE161335od	48	m	0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,5	0,5	105	-0,25
WE161335os			0	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-0,75	0,75	90	-0,375
WE352371od	24	w	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-7,5	0,25	0	-7,375
WE352371os			1	0				0	0	0	0	0	0	0	1,25	1	-8,5	0		-8,5
WE586723od	48	w	2	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1,25	1	0,5	0,5	90	0,75
WE586723os			2	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	1,25	1	0,5	0,5	90	0,75
WE588589od	29	m	1	0				0	0	0	0	0	0	0	1	2	-2,5	2,75	165	-1,125
WE588589os			1	1	1 Keratokonus			9	9	9	9	1	9	9	0,02	4	-4	5	45	-1,5
WE660780od	37	m	0	1	1 Gesichtsfelddefekt			9	9	9	9	9	9	9	0,63	3	-0,5	0,25	10	-0,375
WE660780os			0	1	1 Gesichtsfelddefekt			9	9	9	9	9	9	9	0,63	3	-0,5	0,25	160	-0,375
WI336850od	78	w	0	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,9	2	0,5	0		0,5
WI336850os			0	1	1 Katarakt			1	1	9	9	9	9	9	0,8	2	0,5	0		0,5

ID	Al- ter	Geschlecht	Seh- fehler	Diagnosen	Diagnose 1	Diagnose 2	Diagnose 3	Kata- rakt	Linse	Retina	AMD	Horn- haut	Glau- kom	Ambly- opie	Visus	Visus- gruppe	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent
WI617183od	64	m	0	3	Katarakt	Glaukom	diabet. Retinopathie	1	1	1	2	9	1	9	0,5	3	-0,5	0		-0,5
WI617183os			0	3	Katarakt	Glaukom	diabet. Retinopathie	1	1	1	2	9	1	9	0,63	3	-0,5	0,25	0	-0,375
WO359744od	62	m	2	2	diabet. Retinopathie	Hämophthalmus		9	9	1	2	9	9	9	0,2	4	2,5	0,75	95	2,875
WO359744os			2	1	diabet. Retinopathie			9	9	1	2	9	9	9	0,32	4	2,5	1	70	3
WO680651OD	51	m	1	3	Katarakt	asympt. Papillenexk.	Maculaforamen	1	1	1	2	9	9	9	0,2	4	-1,75	1,5	105	-1
WO680651OS			1	2	Katarakt	asympt. Papillenexkavation		1	1	9	9	9	9	9	1	2	-2,25	1,75	95	-1,375
ZE761694od	66	m	2	2	Katarakt	AMD		1	1	1	1	9	9	9	0,32	4	2	0,5	155	2,25
ZE761694os			2	2	Katarakt	AMD		1	1	1	1	9	9	9	1,25	1	1,25	0,75	20	1,625

Geschlecht: m = männlich, w = weiblich

Sehfehler: 0 = emmetrop, 1 = myop, 2 = hyperop (in der subjektiven Refraktion)

Diagnosen: AMD = altersabhängige Maculadegeneration, IOL = Intraokularlinse, MFL = Multifokallinse, ICL = implantierbare Kontaktlinse, HH = Hornhaut

Katarakt: 0 = gesund, 1 = Katarakt, 2 = Pseudophakie, 9 = andere Erkrankung

Linse: 0 = gesund, 1 = Katarakt, 2 = MFL, 3 = andere Intraokularlinse, 9 = andere Erkrankung

Retina: 0 = gesund, 1 = Netzhauterkrankung, 9 = andere Erkrankung

AMD: 0 = gesund, 1 = altersabhängige Maculadegeneration, 2 = andere Netzhauterkrankung, 9 = andere Erkrankung

Hornhaut: 0 = gesund, 1 = Hornhauterkrankung, 9 = andere Erkrankung

Glaukom: 0 = gesund, 1 = Glaukom, 9 = andere Erkrankung

Amblyopie: 0 = gesund, 1 = Amblyopie, 9 = andere Erkrankung

Visus = bester mit sphärischen und torischen Gläsern erreichbarer (photopischer) Visus (best corrected visual acuity BCVA)

Visusgruppe: 1 = BCVA größer als 1,0; 2 = BCVA 0,8 bis 1,0; 3 = BCVA 0,4 bis 0,7; 4 = BCVA unter 0,4

Sphärisches Äquivalent = Sphäre + ½ Zylinder

## A.2. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 3 mm

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Zr <sup>-1</sup> in µm	Zr <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>-2</sup> in µm	Zs <sup>0</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>-3</sup> in µm	Zs <sup>-1</sup> in µm	Zs <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>3</sup> in µm	Zs <sup>-4</sup> in µm	Zs <sup>-2</sup> in µm	Zs <sup>0</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
AD112007od	-2,884	0,920	170	-2,424	6,523	12.07.01	-0,137	-0,425	0,172	-0,937	0,486	0,006	-0,064	0,124	0,066	0,008	0,010	-0,029	-0,038	-0,022	0,062
AD112007os	-3,193	0,581	169	-2,903	6,495	12.07.01	-0,121	-0,368	0,118	-1,201	0,301	-0,144	0,015	0,092	0,035	-0,038	-0,014	-0,011	-0,036	0,030	0,069
AM147946od	-0,788	1,588	11	0,006	4,596	03.09.01	0,111	-0,495	-0,336	0,404	0,812	-0,199	-0,163	0,122	-0,039	-0,028	-0,064	-0,097	0,014	0,002	0,120
AM147946os	1,221	0,939	16	1,690	4,455	03.09.01	0,806	-0,914	-0,268	1,333	0,436	0,357	-0,106	0,118	-0,161	-0,098	-0,009	-0,013	-0,029	0,145	0,163
AN254478od	-2,132	1,243	89	-1,510	3,757	12.07.01	0,868	-0,679	-0,023	-0,433	-0,698	-0,123	-0,018	-0,092	-0,045	0,024	-0,010	0,035	-0,003	0,011	0,063
AN254478os	-1,429	0,733	85	-1,062	3,422	12.07.01	0,349	0,103	-0,077	-0,185	-0,404	-0,037	0,009	-0,019	-0,101	-0,003	0,049	-0,007	-0,004	-0,017	0,052
AN284390od	0,582	0,996	11	1,080	5,707	31.08.01	0,447	0,108	-0,203	0,996	0,520	-0,035	0,019	0,081	-0,082	-0,009	-0,021	-0,040	-0,018	-0,030	0,054
AN284390os	2,902	3,542	151	4,673	5,569	31.08.01	2,118	0,432	1,682	2,978	1,065	-0,044	0,008	0,112	0,062	0,007	0,002	-0,059	-0,010	-0,029	0,066
AZ604038os	0,066	5,253	74	2,692	3,922	13.07.01	1,410	0,448	-1,525	1,886	-2,530	0,079	0,025	-0,006	-0,022	-0,004	0,006	-0,013	0,036	-0,046	0,052
BA032767od	-0,437	0,374	178	-0,250	5,024	12.07.01	-0,010	-0,037	-0,003	0,262	0,195	0,007	0,004	-0,066	-0,077	-0,033	-0,033	-0,058	0,019	-0,036	0,056
BA032767os	-0,435	0,794	174	-0,038	5,015	12.07.01	0,257	-0,263	0,070	0,379	0,418	0,081	-0,095	0,131	0,102	0,041	-0,008	-0,003	0,060	-0,019	0,089
BA186031od	2,452	0,177	55	2,540	5,935	10.07.01	0,350	-0,107	-0,091	1,802	-0,034	-0,036	0,130	-0,029	-0,129	0,015	-0,010	-0,057	0,008	0,026	0,073
BA186031os	1,804	0,804	137	2,206	5,952	10.07.01	0,385	-0,285	0,442	1,617	0,041	-0,074	-0,064	-0,004	0,055	-0,017	-0,081	-0,079	0,021	-0,045	0,065
BA211717od	2,697	0,686	58	3,040	3,985	27.09.01	-0,418	-0,212	-0,341	2,077	-0,166	-0,049	-0,081	-0,093	-0,052	0,023	-0,024	-0,013	0,014	0,025	0,055
BA211717os	2,673	0,458	137	2,902	4,211	27.09.01	-0,024	-0,082	0,253	2,001	0,029	0,002	0,005	-0,123	0,020	0,007	0,031	-0,028	0,019	-0,029	0,052
BA564995od	-9,558	0,171	176	-9,473	6,110	07.06.01	-0,451	0,122	0,026	-4,825	0,078	-0,021	-0,063	-0,333	-0,098	-0,015	0,025	0,100	-0,022	-0,013	0,136
BA564995os	-8,973	0,152	108	-8,897	6,396	07.06.01	0,156	0,060	0,053	-4,508	-0,055	0,004	0,074	-0,267	-0,136	0,037	-0,004	0,041	0,016	-0,022	0,114
BE110672od	-4,206	3,768	117	-2,322	3,269	11.07.01	0,788	-0,714	1,718	-0,881	-1,241	0,284	0,109	-0,050	-0,318	0,166	0,049	-0,093	-0,107	0,031	0,176
BE139861od	-4,057	0,526	124	-3,794	5,879	10.07.01	0,586	-0,442	0,270	-1,692	-0,099	0,020	0,019	-0,106	0,048	0,012	-0,059	-0,027	-0,023	-0,004	0,053
BE139861os	-2,876	0,617	77	-2,568	5,427	10.07.01	0,636	-0,390	-0,149	-1,016	-0,310	-0,052	-0,003	-0,136	0,017	0,006	-0,002	-0,033	0,011	-0,069	0,069
BE529561od	0,375	0,139	165	0,445	6,326	30.07.01	0,584	-0,313	0,039	0,646	0,066	-0,038	-0,026	-0,055	-0,043	0,012	0,025	-0,025	-0,002	0,016	0,040
BE529561os	-0,039	0,119	94	0,021	5,982	30.07.01	0,678	-0,200	0,029	0,412	-0,017	-0,047	0,020	0,044	-0,070	-0,021	-0,014	-0,029	-0,021	0,062	0,047
BO496552od	-0,146	0,384	73	0,046	4,197	12.06.01	0,323	-0,367	-0,109	0,426	-0,181	-0,010	-0,027	0,084	-0,084	-0,012	0,014	-0,049	-0,014	-0,006	0,054
BO496552os	-0,298	0,429	107	-0,084	4,170	12.06.01	0,425	-0,036	0,132	0,354	-0,202	0,045	0,049	0,039	-0,125	-0,016	-0,014	-0,045	0,016	-0,019	0,060
BU732171os	-2,326	0,779	70	-1,937	3,632	08.08.01	0,128	0,260	-0,300	-0,668	-0,151	-0,018	-0,279	0,011	0,099	0,140	0,251	-0,004	0,112	0,043	0,176
CA227646od	-0,017	0,381	9	0,174	6,353	09.07.01	-0,038	-0,268	-0,067	0,496	0,203	0,032	-0,134	0,081	0,048	0,013	0,015	-0,011	-0,020	-0,001	0,062
CA227646os	-9,838	5,666	68	-7,005	4,453	09.07.01	-1,035	0,155	-2,222	-3,464	-2,177	0,260	0,076	-0,216	0,712	-0,051	0,238	0,074	0,212	0,212	0,332
DA226649od	-7,590	0,573	114	-7,303	6,625	19.09.01	0,155	-0,039	0,239	-3,628	-0,217	0,007	0,028	0,055	-0,038	0,027	0,011	-0,046	0,017	0,004	0,042
DA226649os	-8,240	0,714	82	-7,883	5,915	19.09.01	0,822	0,140	-0,107	-3,948	-0,381	-0,074	-0,037	0,080	-0,045	0,024	-0,059	-0,068	-0,077	0,051	0,071
DO721348od	-6,566	4,623	170	-4,255	3,761	09.08.01	-0,847	-0,634	0,778	-1,947	2,451	-0,097	0,037	1,632	0,016	-0,117	0,033	-0,024	0,009	-0,252	0,593
DO721348os	0,272	2,867	155	1,706	4,291	09.08.01	-2,004	-1,311	1,161	1,342	1,099	-0,646	-0,027	0,002	0,236	-0,131	-0,033	-0,150	0,072	-0,043	0,265
DO830916od	-4,182	0,402	107	-3,981	5,017	21.09.01	0,031	-0,828	0,123	-1,796	-0,188	0,017	-0,016	-0,031	-0,165	0,057	0,029	-0,076	-0,053	-0,062	0,079
DO830916os	-4,359	0,799	83	-3,960	5,298	21.09.01	0,229	-0,428	-0,106	-1,784	-0,436	-0,022	-0,024	0,076	-0,069	0,034	-0,002	0,031	0,045	0,068	0,051
EC290378od	-1,208	0,083	69	-1,167	4,920	06.07.01	0,251	-0,096	-0,006	-0,243	-0,010	0,087	-0,013	-0,106	-0,107	-0,017	-0,002	-0,002	0,004	0,011	0,063
EC290378os	-1,345	0,187	61	-1,252	3,896	06.07.01	0,442	-0,163	-0,088	-0,290	-0,057	0,019	-0,010	-0,047	-0,033	-0,023	-0,002	-0,019	0,012	0,038	0,031
ED563187od	0,588	0,641	26	0,909	3,388	05.07.01	0,008	0,204	-0,128	0,902	0,290	0,005	0,006	-0,109	-0,036	0,000	0,010	-0,026	-0,008	-0,070	0,061
ED563187os	1,676	0,868	11	2,110	3,282	05.07.01	-0,396	0,084	-0,175	1,565	0,456	-0,028	-0,075	0,267	0,125	0,053	0,003	-0,059	0,120	0,013	0,121
EH709364od	0,947	0,662	123	1,278	3,480	20.07.01	-0,244	0,305	0,338	1,105	-0,153	-0,013	0,120	-0,226	-0,110	0,011	-0,075	0,028	-0,017	0,003	0,106
EH709364os	1,415	0,509	92	1,669	3,445	20.07.01	0,548	0,421	0,026	1,321	-0,284	0,137	-0,143	-0,060	-0,139	0,000	-0,023	0,031	-0,094	0,130	0,109
EI214795od	-4,126	1,467	173	-3,392	3,974	29.08.01	0,180	-0,141	0,208	-1,471	0,798	0,016	0,005	-0,021	-0,097	0,014	-0,056	0,012	0,024	0,046	0,068
EI214795os	3,929	0,819	20	4,339	4,514	29.08.01	0,209	1,724	-0,312	2,794	0,315	-0,049	-0,207	0,157	0,096	-0,077	-0,024	0,063	0,181	0,059	0,143
FU997989od	-1,603	0,237	179	-1,484	3,775	09.07.01	0,467	-0,208	-0,002	-0,418	0,119	0,078	-0,076	0,063	0,012	0,004	0,007	0,006	-0,026	-0,009	0,048
FU997989os	-2,915	0,330	67	-2,750	3,314	09.07.01	0,716	-0,127	-0,131	-1,117	-0,131	-0,009	0,115	-0,033	0,048	-0,013	0,040	0,002	-0,076	0,004	0,073
GE426515od	-2,626	0,875	0	-2,189	3,822	29.08.01	-0,129	-0,362	-0,012	-0,807	0,488	0,124	-0,099	-0,267	-0,095	0,025	0,043	-0,061	0,003	-0,024	0,124
GO204868od	-2,514	0,277	68	-2,376	5,337	21.09.01	0,677	-1,661	-0,101	-0,910	-0,097	-0,127	0,134	-0,044	0,174	0,026	-0,028	-0,044	0,042	-0,019	0,096
GR915594od	-3,242	0,257	98	-3,114	6,215	24.09.01	0,204	-0,079	0,059	-1,317	0,028	0,008	-0,024	-0,124	-0,074	-0,006	-0,013	-0,042	-0,009	0,008	0,058
GR915594os	-4,010	0,388	129	-3,816	5,900	24.09.01	0,578	-0,641	0,187	-1,705	-0,035	0,007	0,075	-0,125	-0,094	-0,025	-0,006	0,008	-0,039	-0,016	0,071

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>1</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>1</sub> <sup>+1</sup> in µm	Z <sub>2</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>2</sub> <sup>+2</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>+3</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>+1</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>+2</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-4</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>+2</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>+3</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-1</sup> in µm	RMS-Wert in µm
GU845209od	-0,699	0,173	105	-0,612	4,254	12.06.01	0,225	-0,094	0,034	0,063	-0,084	0,023	-0,074	-0,100	-0,108	0,003	-0,012	-0,015	-0,041	-0,007		0,063	
GU845209os	-0,766	0,235	95	-0,648	4,453	12.06.01	0,483	0,085	0,021	0,043	-0,130	-0,009	-0,014	-0,126	-0,126	-0,012	0,016	0,002	-0,014	0,032		0,066	
GU926999od	0,849	0,341	40	1,020	3,898	26.07.01	0,189	-0,008	-0,174	0,963	0,034	0,032	0,000	-0,276	-0,067	-0,023	0,028	0,015	0,004	0,032		0,111	
GU926999os	-0,639	0,454	60	-0,412	3,534	26.07.01	0,148	-0,166	-0,170	0,173	-0,132	-0,100	-0,060	-0,099	-0,178	0,006	-0,043	0,058	0,008	0,045		0,095	
HA332318od	-0,446	0,122	24	-0,385	6,381	03.08.01	-0,152	-0,035	-0,051	0,188	0,044	0,021	-0,043	-0,230	-0,146	0,017	0,005	-0,016	-0,009	-0,025		0,102	
HA332318os	-0,647	0,348	151	-0,473	5,853	03.08.01	0,312	0,131	0,125	0,139	0,122	-0,041	0,045	-0,182	-0,106	-0,002	0,035	-0,041	-0,038	-0,029		0,089	
HA574691od	-12,315	1,925	173	-11,352	3,866	13.09.01	0,521	-2,212	0,254	-5,862	1,046	-0,021	0,285	0,601	0,629	0,079	-0,285	0,207	0,428	-0,059		0,383	
HA574691os	-12,060	2,049	175	-11,036	3,993	13.09.01	-0,919	0,050	0,232	-5,687	1,110	-0,235	0,095	0,723	0,420	0,045	-0,001	0,188	0,048	-0,116		0,355	
HE192698od	-1,797	1,393	173	-1,101	4,060	19.07.01	-0,366	0,351	0,198	-0,207	0,758	0,069	0,201	-0,368	-0,058	0,135	-0,018	-0,209	-0,193	-0,073		0,194	
HE192698os	-2,624	1,914	138	-1,667	3,231	19.07.01	0,120	-0,342	1,068	-0,519	0,113	0,225	-0,104	-0,266	-0,443	0,116	0,021	-0,069	-0,050	0,044		0,214	
HE201526od	-0,234	0,781	61	0,157	3,664	12.09.01	-0,060	-0,123	-0,375	0,487	-0,229	-0,016	0,036	-0,247	0,172	-0,020	0,027	-0,006	-0,027	0,032		0,116	
HE201526os	-0,071	0,894	74	0,376	4,648	12.09.01	-0,111	0,852	-0,256	0,608	-0,427	-0,211	-0,059	-0,134	-0,239	-0,040	-0,028	-0,082	-0,014	0,008		0,134	
HE357217od	-0,131	0,256	90	-0,003	3,951	07.09.01	0,192	0,162	-0,009	0,399	-0,140	-0,027	-0,050	-0,047	0,000	0,053	-0,013	-0,011	-0,009	-0,010		0,035	
HE357217os	-0,148	0,128	95	-0,084	4,261	07.09.01	0,246	-0,073	0,019	0,354	-0,068	0,004	0,003	-0,007	-0,049	-0,018	0,012	-0,026	-0,031	-0,018		0,029	
HE478927od	-0,774	0,281	58	-0,633	4,220	10.07.01	0,583	-0,306	-0,124	0,051	-0,083	-0,132	0,178	0,182	-0,043	0,081	-0,010	0,030	0,086	0,078		0,118	
HE478927os	-0,105	1,316	173	0,553	3,698	10.07.01	-0,279	-0,589	0,175	0,705	0,715	-0,256	-0,216	-0,050	-0,139	0,050	0,008	0,062	-0,012	0,120		0,146	
HE744676od	-12,832	5,449	92	-10,108	4,091	20.09.01	1,894	-1,202	0,211	-5,175	-3,057	0,323	-0,187	0,031	-0,083	-0,015	0,117	0,117	0,181	-0,006		0,168	
HE744676os	-1,300	0,466	96	-1,067	6,409	20.09.01	0,383	-0,099	0,059	-0,188	-0,253	0,003	0,079	0,044	0,023	-0,026	-0,005	-0,001	0,010	0,027		0,043	
HI423082od	0,896	0,666	5	1,229	5,211	10.07.01	0,051	0,241	-0,074	1,078	0,363	0,008	0,145	-0,097	-0,039	-0,021	0,004	-0,033	0,014	0,020		0,068	
HI423082os	0,785	0,908	174	1,239	5,031	10.07.01	-0,017	-0,473	0,112	1,084	0,498	-0,042	-0,051	-0,098	-0,128	-0,014	-0,051	-0,035	-0,028	-0,006		0,070	
HO193563os	4,164	1,077	168	4,703	3,625	04.07.01	1,353	0,508	0,259	2,994	0,521	-0,153	-0,016	0,137	0,132	-0,019	-0,035	-0,067	-0,169	-0,072		0,146	
HU623219od	-0,232	0,871	63	0,203	4,127	10.08.01	0,651	-0,101	-0,016	0,512	0,443	-0,011	0,159	0,044	0,038	0,047	-0,011	0,007	-0,078	-0,007		0,126	
HU623219os	-1,179	1,020	106	-0,669	3,853	28.08.01	0,216	-0,113	0,279	0,032	-0,461	0,096	-0,187	0,177	0,048	-0,050	-0,034	-0,080	-0,028	-0,057		0,169	
HU894401od	-1,998	0,159	59	-1,919	3,569	12.07.01	0,236	-0,048	-0,074	-0,658	-0,039	-0,010	-0,006	0,081	0,045	0,020	-0,005	-0,024	0,022	0,026		0,041	
HU894401os	-2,630	0,699	105	-2,280	3,300	12.07.01	0,780	-0,306	0,199	-0,857	-0,339	0,041	0,000	-0,055	0,031	0,013	-0,017	0,038	-0,034	0,017		0,045	
JE844003od	-0,510	0,572	173	-0,224	5,911	07.06.01	-0,181	-0,144	0,083	0,277	0,311	0,039	-0,012	-0,026	-0,022	0,001	-0,010	-0,029	0,017	0,015		0,028	
JE844003os	-0,521	0,582	176	-0,229	6,004	07.06.01	-0,117	-0,163	0,047	0,274	0,324	0,017	0,001	0,029	0,071	0,000	-0,001	-0,008	0,008	-0,003		0,031	
JU254589od	-4,137	0,278	56	-3,998	5,737	07.08.01	0,543	-0,163	-0,142	-1,805	-0,062	0,041	-0,030	-0,073	0,061	0,027	-0,005	0,012	0,000	-0,009		0,043	
JU254589os	-3,720	0,218	130	-3,611	5,737	07.08.01	0,069	-0,422	0,110	-1,591	0,005	0,020	0,045	0,015	0,030	0,005	-0,012	-0,010	-0,028	-0,037		0,033	
JU257086od	-2,522	0,701	89	-2,171	3,196	12.07.01	0,933	-0,301	-0,004	-0,797	-0,389	0,010	-0,054	-0,031	-0,101	-0,012	-0,014	-0,003	0,006	0,012		0,050	
JU257086os	-3,206	1,452	90	-2,480	3,637	26.09.01	0,124	-0,233	-0,008	-0,968	-0,816	-0,082	0,050	-0,060	-0,014	0,021	0,011	-0,002	-0,001	0,011		0,042	
KA373246os	-0,682	0,531	66	-0,417	3,799	09.07.01	0,113	0,508	-0,222	0,171	-0,197	-0,055	-0,038	0,043	-0,077	0,002	0,004	-0,040	0,021	0,002		0,045	
KA377407od	-0,415	0,609	35	-0,110	6,291	10.07.01	0,635	-0,186	-0,323	0,340	0,109	-0,063	0,091	0,136	-0,078	0,019	0,028	-0,062	0,032	-0,031		0,077	
KA377407os	-0,057	1,289	154	0,587	6,416	10.07.01	0,243	-0,545	0,570	0,724	0,446	0,022	-0,105	0,193	0,041	-0,020	-0,031	-0,030	-0,010	-0,046		0,085	
KA441033od	-1,075	0,677	62	-0,737	4,059	21.09.01	0,126	-0,072	-0,317	-0,006	-0,209	-0,093	-0,066	-0,138	0,020	-0,039	0,043	-0,080	0,022	-0,003		0,080	
KA441033os	-0,582	0,494	111	-0,335	5,417	21.09.01	0,384	0,195	0,185	0,216	-0,206	0,030	0,006	0,043	0,051	0,057	-0,008	-0,011	-0,006	0,047		0,046	
KA677881od	0,305	0,332	6	0,471	3,244	06.07.01	0,439	-0,091	-0,014	0,660	0,176	-0,078	-0,048	-0,060	-0,209	0,008	0,017	-0,030	0,072	0,035		0,090	
KI798099od	0,108	0,326	102	0,271	6,205	09.07.01	0,120	-0,168	0,071	0,550	-0,169	0,020	-0,021	-0,107	-0,065	0,007	-0,010	0,006	0,046	0,013		0,050	
KI798099os	0,094	0,403	79	0,296	6,333	09.07.01	0,356	-0,152	-0,089	0,564	-0,205	0,001	-0,029	-0,025	-0,001	0,000	0,024	0,027	0,059	0,040		0,031	
KI943338od	0,269	3,270	16	1,904	5,572	13.07.01	-0,586	0,489	-0,995	1,451	1,547	0,094	0,014	0,136	-0,019	0,018	0,009	-0,093	-0,005	-0,013		0,074	
KI943338os	-0,458	4,750	124	1,917	4,838	13.07.01	2,648	-0,936	2,484	1,458	-0,983	-0,006	-0,104	0,199	-0,038	0,025	-0,027	-0,022	0,025	0,054		0,086	
KO217752od	1,224	0,538	130	1,493	5,056	20.07.01	0,039	-0,317	0,296	1,224	-0,058	-0,005	-0,015	-0,105	-0,050	0,001	0,021	-0,021	-0,028	-0,013		0,046	
KO217752os	0,612	0,970	58	1,097	4,460	20.07.01	0,209	0,506	-0,486	1,006	-0,242	0,028	0,072	-0,185	-0,037	0,016	0,126	-0,047	0,005	-0,016		0,103	
KO605241od	1,395	0,614	165	1,703	5,129	12.10.01	-0,109	-0,289	0,079	1,340	0,232	-0,022	0,039	0,004	-0,072	-0,036	0,019	-0,045	0,080	0,034		0,069	
KO605241os	-0,872	0,779	38	-0,482	4,265	12.10.01	-0,037	-0,469	-0,404	0,134	0,108	-0,132	0,039	-0,056	0,012	-0,009	-0,023	0,047	0,006	0,009		0,067	
KR046873od	2,042	0,271	120	2,178	3,669	20.07.01	-0,267	-0,435	-0,003	1,602	-0,045	0,090	0,166	0,076	-0,111	0,082	0,000	-0,062	0,064	0,036		0,097	
KR046873os	1,496	0,254	179	1,622	4,498	20.07.01	0,384	-0,108	0,000	1,295	0,140	-0,046	-0,115	0,014	0,027	-0,008	0,026	-0,031	0,062	0,013		0,055	
KR069752od	-0,385	0,816	116	0,023	4,943	26.07.01	0,003	-0,644	0,356	0,413	-0,284	-0,041	-0,005	-0,065	-0,119	0,030	-0,004	-0,029	-0,003	-0,026		0,057	
KR069752os	-0,444	0,315	63	-0,287	5,287	26.07.01	0,454	0,252	-0,132	0,242	-0,106	-0,065	0,002	-0,042	-0,029	0,030	-0,023	0,015	0,028	-0,001		0,040	
KR323211od	0,894	0,535	29	1,161	4,969	26.07.01	-0,190	0,151	-0,260	1,041	0,135	0,091	-0,054	0,082	-0,069	0,030	-0,012	-0,004	-0,013	-0,003		0,066	
KR323211os	0,299	1,464	165	1,030	4,444	26.07.01	0,010	-0,936	0,403	0,969	0,718	-0,121	-0,133	0,024	0,048	-0,006	-0,017	-0,012	-0,045	-0,030		0,070	

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>r</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>r</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>r</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>r</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>3</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>-4</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>a</sub> <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
KU051750od	1,801	1,326	180	2,464	3,745	27.07.01	0,241	0,505	0,005	1,760	0,746	-0,005	-0,001	-0,048	-0,162	-0,037	-0,036	0,001	-0,112	0,053	0,078
KU051750os	1,273	1,157	167	1,852	3,287	27.07.01	0,085	0,018	0,286	1,422	0,582	0,115	0,071	0,031	-0,175	-0,108	-0,029	-0,085	-0,065	-0,062	0,113
LI026591od	-0,624	0,171	122	-0,538	3,299	12.07.01	0,382	0,070	0,086	0,103	-0,042	-0,012	-0,050	-0,038	-0,034	-0,004	-0,034	0,016	0,009	-0,002	0,032
LI026591os	-1,019	0,653	82	-0,693	3,228	12.07.01	0,150	-0,247	-0,063	0,018	-0,349	-0,026	-0,033	-0,182	-0,128	-0,018	-0,026	0,022	0,021	0,038	0,109
LI225381od	0,660	0,150	127	0,735	6,090	09.07.01	0,323	-0,252	0,076	0,806	-0,023	0,034	0,016	0,025	-0,029	-0,018	-0,002	-0,077	-0,017	-0,023	0,046
LI619718od	-0,239	0,639	86	0,081	6,086	23.07.01	0,324	-0,026	-0,043	0,445	-0,356	-0,032	0,040	-0,054	-0,036	0,004	0,009	-0,029	-0,005	0,024	0,037
LI619718os	-0,775	1,072	83	-0,239	6,251	23.07.01	-0,040	-0,154	-0,138	0,269	-0,586	-0,043	-0,112	-0,089	-0,089	-0,006	0,009	-0,003	-0,009	0,009	0,062
MA587838os	1,140	0,624	142	1,453	3,071	30.07.01	0,227	-0,347	0,337	1,202	0,092	0,007	0,013	0,042	-0,204	0,005	-0,039	-0,057	-0,032	-0,012	0,084
ME239181od	-0,264	1,225	179	0,348	3,644	13.09.01	-0,607	-1,622	0,014	0,592	0,687	-0,270	-0,265	-0,363	0,164	-0,134	0,064	0,122	-0,012	-0,155	0,229
ME239181os	-0,452	0,823	179	-0,041	4,076	13.09.01	0,094	-0,315	0,021	0,378	0,461	-0,099	0,015	-0,023	-0,109	0,005	-0,018	-0,037	-0,041	0,001	0,059
ME473094od	-3,357	0,822	120	-2,946	4,399	13.07.01	-0,126	-0,405	0,398	-1,225	-0,235	0,059	-0,017	-0,029	-0,110	-0,004	-0,009	-0,028	0,029	-0,014	0,052
ME473094os	-4,686	0,938	135	-4,217	3,936	13.07.01	0,081	-0,212	0,527	-1,926	0,004	-0,088	-0,098	-0,063	-0,081	0,071	-0,043	-0,015	-0,007	-0,017	0,069
MU095181od	-5,262	0,198	36	-5,163	3,591	11.07.01	0,875	-0,469	-0,105	-2,448	0,037	0,010	-0,035	-0,105	-0,020	-0,016	-0,013	-0,005	-0,024	0,001	0,053
MU095181os	-5,116	0,168	84	-5,032	3,569	11.07.01	0,503	-0,418	-0,019	-2,375	-0,091	0,021	-0,002	-0,023	-0,015	-0,003	-0,005	-0,009	0,004	-0,034	0,023
MU634865od	-0,066	0,982	72	0,426	3,448	12.06.01	-0,314	-0,154	-0,328	0,635	0,443	0,024	-0,011	-0,215	-0,229	-0,024	0,009	0,028	0,005	-0,054	0,115
MU634865os	-0,189	1,414	120	0,518	3,208	12.06.01	-0,264	0,057	0,688	0,686	-0,400	-0,026	0,030	-0,180	-0,187	0,043	-0,011	-0,001	-0,007	-0,015	0,096
PA953782od	0,370	0,206	74	0,473	6,464	07.06.01	-0,031	-0,077	-0,035	0,661	-0,107	-0,021	0,000	-0,121	-0,043	-0,048	-0,010	-0,049	0,026	0,016	0,061
PA953782os	0,338	0,389	101	0,533	6,982	07.06.01	0,066	0,473	0,076	0,694	-0,201	-0,031	-0,120	-0,022	-0,091	-0,037	0,018	-0,061	0,030	-0,020	0,071
PE522314od	-0,628	0,234	89	-0,511	5,760	06.08.01	0,410	-0,159	-0,004	0,119	-0,129	0,030	-0,009	-0,011	-0,060	0,000	-0,018	0,007	-0,021	-0,031	0,030
PE522314os	-0,401	0,368	68	-0,217	6,114	06.08.01	0,122	0,099	-0,141	0,281	-0,146	0,011	-0,002	-0,099	-0,114	0,003	0,007	-0,028	-0,016	-0,086	0,065
PF945972od	0,053	0,369	119	0,238	6,864	06.08.01	0,282	-0,319	0,174	0,531	-0,111	0,058	-0,121	0,077	0,022	0,027	-0,006	-0,041	-0,011	0,007	0,061
PF945972os	-0,331	0,718	68	0,028	6,444	06.08.01	0,079	0,077	-0,281	0,416	-0,282	-0,052	0,030	0,028	0,067	-0,010	0,005	0,013	-0,027	0,038	0,040
PF947734od	0,316	0,120	106	0,375	5,059	06.08.01	0,083	-0,062	0,029	0,607	-0,058	0,089	-0,001	-0,001	-0,087	0,005	0,037	-0,054	-0,007	-0,015	0,053
PF947734os	0,271	0,369	95	0,456	5,155	06.08.01	-0,305	-0,348	-0,063	0,652	-0,078	0,037	0,031	0,074	-0,103	-0,037	-0,002	-0,037	-0,009	-0,007	0,058
PI499222od	-0,210	0,913	45	0,247	3,933	11.09.01	0,154	0,417	-0,510	0,536	-0,005	-0,083	0,089	0,063	-0,023	0,026	-0,031	-0,019	-0,076	-0,017	0,061
PI499222os	-2,988	0,344	171	-2,816	4,489	11.09.01	-0,434	0,074	0,059	-1,153	0,181	0,002	0,103	-0,309	-0,287	0,013	-0,063	-0,022	-0,223	-0,072	0,172
PO115925od	0,271	0,816	100	0,679	5,904	11.07.01	0,189	-0,510	0,159	0,775	-0,430	-0,124	-0,026	-0,092	0,021	0,045	0,002	0,012	0,103	-0,078	0,092
PU656157od	-1,228	1,053	10	-0,701	4,333	05.09.01	-0,198	0,046	-0,202	0,013	0,556	-0,101	-0,114	0,037	0,048	0,060	-0,020	-0,070	0,044	0,024	0,077
PU656157os	0,751	0,495	51	0,998	4,734	05.09.01	-0,846	1,035	-0,269	0,951	-0,065	0,026	-0,095	0,256	0,052	-0,052	0,070	-0,092	-0,021	0,054	0,116
RE065709od	-10,998	2,655	111	-9,670	5,127	05.09.01	2,142	-0,205	1,012	-4,934	-1,093	0,090	0,032	0,342	-0,231	0,090	0,007	0,070	0,212	0,011	0,199
RE065709os	-5,185	3,374	79	-3,498	4,582	05.09.01	-0,833	-0,032	-0,719	-1,529	-1,756	-0,661	-0,088	0,272	0,220	0,236	-0,159	0,061	0,397	0,066	0,311
RE623462od	-0,376	1,196	107	0,222	5,408	24.07.01	-0,098	-1,527	0,374	0,523	-0,556	-0,238	0,033	-0,158	-0,304	0,065	-0,101	-0,070	0,097	0,008	0,171
RE623462os	-0,377	1,018	30	0,132	4,797	24.07.01	0,188	0,219	-0,373	0,473	-0,032	-0,201	0,033	-0,070	-0,106	0,044	0,138	-0,064	0,158	0,087	0,146
RI250036od	-1,470	1,471	91	-0,735	5,903	31.07.01	0,982	-0,734	0,036	-0,005	-0,825	0,005	0,015	-0,110	-0,093	-0,027	0,012	-0,052	-0,050	-0,035	0,063
RI250036os	-1,485	2,257	96	-0,357	5,795	31.07.01	1,056	0,548	0,265	0,204	-1,240	0,054	-0,029	-0,034	-0,047	-0,033	0,016	-0,033	-0,034	-0,011	0,042
RO413222od	-0,004	0,356	2	0,174	4,595	27.09.01	-0,058	0,006	0,008	0,496	0,192	-0,057	0,084	0,009	-0,105	-0,022	-0,049	-0,036	0,043	0,010	0,063
RO413222os	-0,200	0,556	6	0,077	4,428	27.09.01	0,162	-0,095	-0,035	0,443	0,303	0,053	-0,187	-0,008	-0,070	0,016	0,018	-0,010	-0,026	-0,083	0,109
RO651419od	-6,623	2,481	112	-5,383	5,094	13.09.01	0,024	-0,379	0,977	-2,569	-0,996	0,077	0,008	-0,174	-0,043	-0,024	-0,072	-0,035	0,001	0,017	0,078
RO651419os	-1,089	0,583	100	-0,797	5,413	13.09.01	0,108	-0,111	0,137	-0,039	-0,280	0,082	0,053	-0,150	0,159	-0,049	0,047	0,023	0,054	0,067	0,097
RU267995od	-5,713	0,340	114	-5,543	4,974	07.06.01	0,372	-0,640	0,094	-2,657	-0,127	0,068	0,022	-0,157	-0,075	-0,038	-0,023	-0,051	-0,064	-0,089	0,089
RU267995os	-5,125	0,727	101	-4,762	5,537	07.06.01	0,298	-0,191	0,149	-2,226	-0,381	-0,015	0,008	-0,090	-0,034	0,015	-0,032	0,021	-0,012	-0,011	0,045
SA004309od	2,174	0,384	144	2,366	4,410	12.07.01	0,234	0,103	0,205	1,706	0,066	-0,157	-0,055	0,201	0,064	0,135	-0,072	-0,071	0,065	0,096	0,119
SC019341od	-0,825	0,797	26	-0,427	6,596	04.07.01	0,212	0,248	-0,349	0,165	0,272	-0,013	0,007	0,043	-0,041	0,025	0,044	0,009	0,013	-0,002	0,041
SC019341os	-0,836	0,564	159	-0,554	6,745	04.07.01	0,104	-0,189	0,189	0,095	0,243	-0,023	-0,025	0,020	-0,041	-0,001	0,013	0,000	-0,078	0,049	0,044
SC083847od	0,938	0,949	80	1,413	4,212	05.07.01	1,123	-1,101	-0,197	1,180	-0,486	-0,064	-0,162	0,073	-0,348	-0,045	-0,062	-0,101	-0,135	-0,198	0,187
SC083847os	-2,340	0,765	12	-1,957	4,589	05.07.01	-0,356	0,176	-0,172	-0,679	0,391	-0,151	-0,318	0,042	0,020	-0,007	-0,027	-0,430	-0,012	-0,053	0,234
SC110335od	-4,277	3,022	165	-2,765	3,375	30.07.01	0,183	1,794	0,812	-1,125	1,484	-0,037	-0,053	0,061	0,218	0,053	-0,029	-0,098	-0,033	0,110	0,119
SC110335os	-1,734	3,329	2	-0,069	3,107	30.07.01	-0,365	0,390	-0,147	0,362	1,865	0,055	-0,023	-0,117	0,095	-0,027	0,044	-0,056	0,029	0,026	0,075
SC111608od	-4,424	3,885	16	-2,481	3,841	20.07.01	0,416	0,793	-1,177	-0,968	1,841	-0,117	0,077	0,145	0,237	0,056	0,026	-0,057	-0,017	0,024	0,116
SC280880od	0,301	0,551	96	0,576	3,242	31.08.01	0,384	-0,240	0,055	0,718	-0,302	-0,015	-0,072	-0,057	-0,027	-0,016	-0,005	0,004	0,004	-0,019	0,043
SC280880os	0,304	0,981	90	0,795	3,187	31.08.01	0,400	-0,059	-0,009	0,839	-0,551	0,055	0,017	-0,020	-0,016	-0,007	-0,027	-0,022	0,002	-0,009	0,032



ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Zr <sup>-1</sup> in µm	Zr <sup>1</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>0</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>3</sup> in µm	Zr <sup>3+</sup> in µm	Zr <sup>3</sup> in µm	Zr <sup>3</sup> in µm	Zr <sup>4</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>0</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
SC917856od	-1,458	1,297	7	-0,809	6,455	12.10.01	0,016	-0,509	-0,173	-0,046	0,708	0,047	-0,112	0,045	0,031	0,008	-0,016	-0,047	0,026	0,002	0,054
SC917856os	-1,674	1,250	161	-1,049	6,371	12.10.01	-0,080	-0,290	0,438	-0,178	0,548	-0,005	0,025	-0,024	0,044	0,015	-0,020	-0,045	0,016	0,029	0,036
SE495728od	-0,885	0,468	168	-0,651	4,264	05.09.01	0,079	-0,214	0,108	0,041	0,239	0,036	-0,016	-0,147	-0,055	-0,002	-0,001	-0,041	-0,001	-0,019	0,072
SE495728os	-1,089	0,917	168	-0,630	4,091	05.09.01	-0,342	-0,094	0,213	0,053	0,467	-0,060	0,099	-0,136	-0,098	0,010	-0,051	-0,046	-0,012	0,042	0,084
SP647235od	-1,323	0,976	14	-0,835	5,535	02.08.01	0,133	0,097	-0,231	-0,060	0,487	-0,017	0,099	-0,064	-0,132	0,027	0,005	-0,050	-0,011	0,051	0,072
SP647235os	-1,312	0,856	170	-0,884	5,419	02.08.01	0,420	-0,551	0,160	-0,087	0,445	-0,048	-0,085	0,024	-0,043	-0,030	0,020	-0,052	-0,037	-0,048	0,061
SP671642od	-0,595	0,833	9	-0,179	3,411	12.10.01	-0,504	-0,474	-0,149	0,302	0,444	-0,075	-0,032	0,024	-0,190	0,032	0,004	0,038	-0,002	0,058	0,080
SP671642os	0,166	0,227	45	0,279	4,241	12.10.01	-0,025	-0,170	-0,127	0,554	-0,001	-0,028	0,009	-0,079	-0,109	0,013	0,071	-0,016	0,023	0,004	0,062
ST274777od	1,838	0,189	108	1,932	4,199	05.07.01	0,229	-0,058	0,064	1,466	-0,060	-0,105	-0,109	0,081	-0,077	0,007	-0,001	-0,037	-0,017	0,013	0,075
ST274777os	1,695	0,143	74	1,766	4,540	05.07.01	0,314	-0,029	-0,026	1,375	0,030	-0,051	0,030	0,003	-0,178	0,046	-0,011	-0,039	-0,026	-0,077	0,078
ST314289od	-4,169	0,635	13	-3,852	3,554	06.07.01	0,478	0,135	-0,151	-1,725	0,323	-0,011	0,014	0,042	-0,015	0,033	0,002	0,009	0,006	0,005	0,026
ST314289os	-3,895	0,455	178	-3,667	3,727	06.07.01	0,183	-0,218	0,017	-1,622	0,255	-0,031	-0,007	-0,044	-0,083	0,001	0,000	0,020	0,007	0,021	0,041
ST316587od	-8,450	1,751	99	-7,574	5,433	09.07.01	0,119	-0,756	0,269	-3,778	-0,908	-0,143	-0,030	0,153	0,191	-0,179	-0,031	-0,074	-0,165	-0,187	0,178
ST316587os	-9,758	1,810	74	-8,853	4,647	09.07.01	1,144	0,401	-0,549	-4,483	-0,856	0,228	-0,065	-0,203	-0,042	-0,059	0,178	0,033	-0,159	-0,131	0,191
ST415248od	0,165	0,754	78	0,542	3,037	12.07.01	0,400	-1,157	-0,170	0,699	-0,387	-0,031	-0,005	0,140	0,061	0,002	0,059	-0,065	0,012	-0,031	0,086
ST478523od	1,600	0,957	176	2,079	4,899	04.07.01	1,814	-0,853	0,078	1,547	0,532	-0,133	-0,061	-0,051	0,032	-0,035	-0,008	-0,030	0,054	-0,007	0,063
ST478523os	1,922	0,896	2	2,370	4,664	04.07.01	0,639	-0,128	-0,036	1,708	0,499	-0,011	0,108	-0,001	-0,018	0,030	-0,056	-0,024	-0,036	0,035	0,069
ST630910od	-0,878	0,636	16	-0,559	5,664	31.07.01	0,316	-0,205	-0,192	0,092	0,301	-0,013	-0,001	-0,086	-0,089	0,000	-0,025	-0,002	0,008	0,006	0,046
ST630910os	-1,169	0,685	166	-0,826	5,840	31.07.01	0,326	-0,299	0,180	-0,055	0,340	-0,025	0,036	-0,050	0,019	-0,009	0,020	-0,007	-0,022	0,011	0,031
TA517591od	2,605	0,634	160	2,922	5,350	24.07.01	-0,045	-0,181	0,232	2,012	0,268	0,025	-0,104	0,203	0,059	-0,013	-0,013	-0,063	-0,030	0,004	0,095
TA517591os	2,537	0,730	22	2,902	4,378	24.07.01	-0,120	-0,104	-0,283	2,001	0,296	-0,013	-0,146	0,162	0,061	0,015	0,046	-0,065	-0,050	-0,069	0,092
TH553416os	-2,838	4,340	180	-0,667	3,748	21.09.01	-0,605	-0,822	0,008	0,032	2,441	-0,079	-0,066	0,100	0,082	0,028	0,007	-0,068	0,117	-0,038	0,084
TR345212od	-0,851	0,893	83	-0,405	5,235	23.07.01	0,220	-0,621	-0,128	0,177	-0,484	0,093	-0,058	-0,163	-0,084	-0,027	0,029	0,025	0,007	0,003	0,082
TR345212os	-1,051	0,543	80	-0,780	3,822	23.07.01	-0,024	1,209	-0,102	-0,030	-0,288	0,143	-0,194	-0,086	0,020	-0,082	0,044	0,017	-0,046	0,076	0,111
VA276733od	0,596	1,127	178	1,160	4,518	10.07.01	0,021	-0,252	0,055	1,040	0,631	0,077	0,054	-0,014	0,036	-0,032	0,008	-0,068	-0,035	0,002	0,051
VA276733os	0,391	0,772	12	0,777	4,602	10.07.01	-0,265	-0,013	-0,182	0,829	0,389	-0,135	-0,079	0,094	-0,021	-0,018	-0,004	-0,040	-0,031	0,063	0,073
VO323688od	-1,832	1,176	179	-1,244	5,459	17.09.01	-0,230	0,147	0,031	-0,286	0,660	0,186	-0,015	-0,149	-0,267	0,023	-0,025	0,049	0,014	-0,037	0,130
VO323688os	-1,657	0,750	9	-1,282	4,864	17.09.01	-0,314	-0,268	-0,114	-0,307	0,396	-0,022	-0,098	-0,118	-0,114	0,026	0,006	0,008	-0,014	-0,011	0,074
VO328285od	0,125	0,511	82	0,381	5,924	20.07.01	0,326	-0,787	-0,083	0,610	-0,271	-0,030	0,022	-0,053	-0,146	-0,024	0,004	-0,030	0,014	0,018	0,061
VO328285os	0,059	0,714	85	0,416	6,153	20.07.01	0,427	0,432	-0,074	0,630	-0,394	0,011	-0,006	-0,102	-0,092	-0,030	0,010	-0,025	0,001	-0,009	0,052
VO660698od	-1,976	0,750	97	-1,601	5,940	04.07.01	0,475	-0,549	0,114	-0,483	-0,402	-0,019	-0,041	0,031	-0,005	-0,066	-0,047	-0,008	-0,003	-0,007	0,038
VO660698os	-3,101	0,981	75	-2,611	6,465	04.07.01	0,513	0,433	-0,277	-1,040	-0,470	-0,006	0,062	0,065	0,062	0,008	-0,016	0,005	-0,015	-0,009	0,050
WE161335od	-0,430	0,617	102	-0,122	5,096	10.07.01	0,318	-0,021	0,145	0,333	-0,313	0,050	-0,003	-0,025	0,027	0,044	0,020	-0,010	-0,027	0,018	0,032
WE161335os	-0,797	0,794	97	-0,400	5,134	10.07.01	0,861	0,326	0,102	0,180	-0,428	-0,025	-0,040	0,022	0,076	-0,049	0,015	-0,034	-0,043	0,004	0,058
WE352371od	-6,794	0,148	159	-6,720	3,851	19.07.01	0,021	-0,077	0,043	-3,307	0,067	-0,014	-0,035	-0,073	-0,055	0,006	-0,028	-0,005	0,001	0,001	0,040
WE352371os	-7,646	0,098	36	-7,597	3,977	19.07.01	0,598	-0,281	-0,028	-3,791	0,025	0,034	-0,019	-0,068	-0,115	0,013	-0,020	0,012	-0,023	-0,071	0,056
WE586723od	0,967	0,527	90	1,230	6,829	17.09.01	0,403	-0,247	-0,004	1,079	-0,292	0,043	-0,018	-0,025	0,029	0,000	0,019	-0,024	0,012	-0,008	0,030
WE586723os	0,756	0,821	81	1,167	6,886	17.09.01	0,433	0,301	-0,136	1,044	-0,440	-0,047	-0,083	-0,119	0,066	0,045	0,015	0,026	-0,013	-0,040	0,065
WE588589od	-1,631	3,704	174	0,221	5,968	04.09.01	0,157	-0,973	0,450	0,522	2,034	-0,142	-0,088	0,098	-0,536	0,105	-0,017	-0,046	-0,067	0,001	0,207
WE660780od	0,053	0,409	10	0,258	5,955	17.09.01	-0,536	-0,263	-0,077	0,543	0,214	-0,021	0,021	0,133	-0,112	-0,044	0,021	-0,113	-0,008	-0,059	0,089
WE660780os	0,028	0,341	151	0,199	5,467	17.09.01	-0,329	-0,173	0,152	0,510	0,102	-0,049	0,025	0,112	-0,026	0,003	-0,004	-0,083	-0,037	-0,011	0,065
WI336850od	0,607	0,455	9	0,834	4,562	13.07.01	-0,033	0,261	-0,091	0,861	0,234	0,128	-0,062	0,040	-0,057	-0,006	0,005	-0,096	-0,077	-0,014	0,085
WI336850os	-0,144	0,878	104	0,295	4,554	13.07.01	0,329	0,137	0,231	0,563	-0,435	-0,186	-0,083	-0,091	-0,008	-0,024	-0,040	-0,012	0,041	0,034	0,088
WI617183od	-3,142	4,046	143	-1,119	3,703	19.07.01	-0,485	-2,719	2,198	-0,217	0,583	0,038	0,535	-0,439	0,224	-0,658	-0,409	-0,372	-0,221	0,357	0,636
WI617183os	0,046	0,132	91	0,112	5,258	19.07.01	0,855	0,186	0,002	0,462	-0,074	-0,026	-0,153	0,178	-0,019	-0,085	-0,010	-0,057	0,112	0,264	0,132
WO359744os	2,270	0,889	94	2,714	4,034	10.07.01	0,420	-0,181	0,067	1,898	-0,495	0,037	0,025	0,001	-0,011	0,000	0,013	0,013	0,025	0,027	0,058
ZE761694od	1,353	0,663	168	1,684	4,872	07.08.01	0,019	0,116	0,154	1,330	0,336	0,012	0,037	0,031	-0,132	-0,007	-0,050	-0,028	-0,024	-0,007	0,058
ZE761694os	1,394	0,692	7	1,740	5,112	07.08.01	0,426	-0,247	-0,091	1,360	0,378	0,087	-0,052	0,028	-0,075	-0,007	0,001	0,021	-0,052	0,057	0,057

## A.3. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 4 mm

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>1</sub> <sup>-1</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>1</sub> <sup>1</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>2</sub> <sup>-2</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>2</sub> <sup>0</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>2</sub> <sup>2</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>3</sub> <sup>-3</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>3</sub> <sup>-1</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>3</sub> <sup>1</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>3</sub> <sup>3</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>4</sub> <sup>-4</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>4</sub> <sup>-2</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>4</sub> <sup>0</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>4</sub> <sup>2</sup> in $\mu\text{m}$	Z <sub>4</sub> <sup>4</sup> in $\mu\text{m}$	RMS-Wert in $\mu\text{m}$
AD112007od	-2,925	0,844	170	-2,503	6,523	12.07.01	0,019	-0,688	0,278	-1,743	0,796	0,009	-0,184	0,170	0,070	0,038	-0,023	-0,031	0,020	-0,007	0,097
AD112007os	-3,173	0,485	174	-2,931	6,431	12.07.01	0,317	-0,676	0,103	-2,163	0,474	-0,183	-0,028	0,311	0,031	0,008	-0,035	-0,012	-0,045	0,066	0,133
AM147946od	-1,139	1,565	13	-0,357	4,596	03.09.01	0,334	-0,887	-0,685	0,362	1,395	-0,450	-0,318	0,158	0,097	-0,105	0,072	-0,209	-0,072	-0,029	0,236
AM147946os	1,115	0,911	16	1,570	4,455	03.09.01	1,255	-1,439	-0,480	2,252	0,758	0,722	-0,209	0,213	-0,266	-0,304	0,019	-0,154	-0,003	0,356	0,340
AN254478od	-2,203	1,285	87	-1,560	5,679	12.07.01	0,574	-0,880	-0,114	-0,818	-1,280	-0,102	-0,115	-0,150	-0,061	-0,082	-0,066	-0,041	-0,036	0,025	0,095
AN254478os	-1,521	0,523	107	-1,260	5,347	12.07.01	0,571	-1,077	0,280	-0,523	-0,438	-0,120	-0,098	-0,023	-0,265	0,060	-0,032	-0,006	0,007	-0,047	0,116
AN284390od	0,515	0,902	13	0,967	5,707	31.08.01	0,719	0,222	-0,394	1,660	0,809	-0,028	0,075	0,132	-0,228	-0,017	0,003	-0,071	-0,059	-0,029	0,110
AN284390os	2,738	3,494	151	4,485	5,569	31.08.01	3,045	0,574	2,966	5,110	1,847	-0,139	-0,036	0,222	0,102	-0,064	-0,053	-0,117	-0,070	-0,057	0,128
BA032767od	-0,595	0,400	4	-0,395	5,024	12.07.01	-0,137	-0,067	-0,045	0,325	0,388	0,011	0,026	-0,131	-0,112	-0,028	-0,011	-0,081	0,009	-0,008	0,082
BA032767os	-0,543	0,930	175	-0,077	5,015	12.07.01	0,559	-0,528	0,132	0,636	0,892	0,142	-0,186	0,193	-0,007	0,050	-0,003	-0,068	0,058	-0,059	0,137
BA186031od	2,185	0,184	52	2,277	5,935	10.07.01	0,438	0,084	-0,177	2,945	-0,045	-0,091	0,201	-0,039	-0,235	0,045	0,017	-0,186	0,006	0,028	0,144
BA186031os	1,616	0,585	143	1,908	5,952	10.07.01	0,536	-0,449	0,557	2,583	0,167	-0,096	-0,001	0,102	-0,077	0,012	-0,147	-0,198	0,089	-0,074	0,122
BA211717os	2,506	0,538	140	2,775	4,211	27.09.01	-0,219	-0,119	0,524	3,433	0,106	-0,002	-0,046	-0,142	-0,015	-0,004	0,047	-0,115	0,029	-0,019	0,081
BA564995od	-9,322	0,119	118	-9,263	6,110	07.06.01	-1,126	0,018	0,078	-8,372	-0,081	0,035	-0,102	-0,402	0,122	-0,028	-0,001	0,031	-0,219	-0,269	0,194
BA564995os	-8,930	0,187	92	-8,836	6,396	07.06.01	-0,227	0,203	0,009	-7,954	-0,180	-0,054	0,106	-0,357	0,089	0,032	-0,078	-0,023	-0,153	-0,230	0,169
BE139861od	-4,067	0,461	113	-3,837	5,809	10.07.01	0,630	-0,447	0,326	-3,051	-0,306	-0,031	0,098	-0,321	0,120	0,015	-0,052	0,027	-0,100	-0,046	0,136
BE139861os	-2,914	0,643	78	-2,593	5,427	10.07.01	0,541	-0,514	-0,267	-1,831	-0,577	0,006	0,009	-0,378	0,051	-0,019	-0,034	0,035	-0,044	-0,102	0,152
BE529561od	0,253	0,148	152	0,327	6,326	30.07.01	0,644	-0,495	0,121	1,033	0,080	-0,049	-0,085	-0,110	-0,134	0,045	0,026	-0,088	-0,008	0,013	0,086
BE529561os	-0,149	0,118	93	-0,090	5,982	30.07.01	0,978	-0,237	0,025	0,623	-0,106	-0,086	0,055	0,152	-0,176	-0,018	0,006	-0,081	-0,017	0,037	0,099
BO496552od	-0,294	0,382	76	-0,102	4,197	12.06.01	0,603	-0,572	-0,177	0,611	-0,337	0,010	-0,101	0,150	-0,190	-0,004	0,001	-0,103	0,000	0,002	0,106
BO496552os	-0,434	0,417	102	-0,225	4,170	12.06.01	0,694	0,058	0,165	0,491	-0,383	0,087	0,109	0,146	-0,276	0,040	-0,073	-0,093	-0,008	-0,046	0,134
BU732171os	-3,869	0,524	9	-3,607	5,214	28.08.01	-1,057	0,082	-0,159	-2,825	0,497	0,050	-0,777	0,308	0,424	0,276	0,226	0,106	0,224	-0,066	0,363
CA227646od	0,054	0,251	4	0,180	6,353	09.07.01	0,130	-0,609	-0,032	0,888	0,247	0,000	-0,230	0,195	0,112	0,046	0,070	0,027	-0,095	-0,016	0,122
CA227646os	-9,147	4,699	69	-6,797	4,453	09.07.01	-1,905	0,226	-3,128	-5,954	-3,225	0,430	-0,048	-0,744	1,542	-0,240	0,533	0,134	0,352	0,511	0,701
DA226649od	-7,693	0,479	118	-7,454	6,625	19.09.01	0,378	-0,110	0,390	-6,598	-0,276	-0,024	-0,082	0,172	-0,084	0,037	-0,012	-0,080	0,054	-0,004	0,092
DA226649os	-8,515	0,847	80	-8,091	5,915	19.09.01	1,306	0,096	-0,299	-7,223	-0,791	-0,220	-0,115	0,169	-0,210	0,015	-0,083	-0,142	-0,087	-0,039	0,160
DO721348os	-0,343	2,973	159	1,144	4,291	09.08.01	-2,755	-1,849	1,936	1,834	2,249	-1,476	-0,047	-0,061	0,280	-0,214	-0,120	-0,432	0,144	0,133	0,584
DO830916od	-4,487	0,579	104	-4,198	5,017	21.09.01	0,065	-1,161	0,279	-3,405	-0,507	0,021	-0,019	0,014	-0,204	0,105	0,054	-0,106	-0,072	-0,120	0,107
DO830916os	-4,270	0,669	82	-3,935	5,298	21.09.01	0,497	-0,601	-0,190	-3,148	-0,641	-0,005	-0,044	0,226	-0,016	0,009	0,014	-0,032	0,048	0,062	0,087
EC290378od	-1,210	0,078	76	-1,171	4,920	06.07.01	0,147	-0,134	-0,021	-0,436	-0,053	0,183	0,007	-0,179	-0,229	-0,029	0,001	-0,007	-0,014	0,021	0,124
EC290378os	-1,344	0,161	65	-1,264	4,349	06.07.01	0,358	-0,193	-0,125	-0,528	-0,083	0,028	0,000	-0,137	-0,155	-0,035	0,011	-0,030	-0,014	0,015	0,086
EI214795os	3,778	0,977	13	4,267	4,514	29.08.01	0,528	1,880	-0,417	4,896	0,874	-0,353	-0,422	0,317	0,293	-0,202	-0,081	-0,050	0,236	0,130	0,281
FU997989od	-1,394	0,094	72	-1,347	5,373	09.07.01	0,890	-0,416	-0,012	-0,609	0,069	0,145	-0,178	0,168	0,080	0,033	0,040	0,016	-0,034	-0,039	0,108
FU997989os	-2,471	0,709	72	-2,116	5,042	09.07.01	1,346	-0,097	-0,399	-1,364	-0,578	-0,116	0,215	-0,085	0,016	-0,005	0,001	0,061	0,083	0,014	0,112
GO204868od	-2,704	0,311	52	-2,549	5,337	21.09.01	0,745	-1,909	-0,302	-1,788	-0,074	-0,307	0,359	-0,352	0,296	0,008	-0,042	-0,091	0,118	0,005	0,241
GR915594od	-3,358	0,180	95	-3,267	6,215	24.09.01	0,048	-0,149	0,048	-2,493	0,028	-0,015	-0,020	-0,206	-0,123	0,039	-0,022	-0,106	-0,020	-0,018	0,105
GR915594os	-4,048	0,349	125	-3,873	5,900	24.09.01	0,607	-0,766	0,315	-3,087	-0,119	0,039	0,036	-0,133	-0,193	-0,027	-0,011	-0,074	-0,018	0,023	0,099
GU845209od	-0,831	0,279	93	-0,692	4,254	12.06.01	0,136	-0,227	0,027	0,033	-0,276	-0,008	-0,067	-0,135	-0,146	0,032	-0,006	-0,062	-0,059	-0,040	0,085
GU845209os	-0,878	0,349	94	-0,704	4,453	12.06.01	0,453	0,081	0,044	0,022	-0,346	-0,018	-0,045	-0,167	-0,220	-0,040	-0,021	-0,069	-0,074	-0,025	0,109
HA332318od	-0,543	0,103	30	-0,492	6,381	03.08.01	-0,628	-0,136	-0,085	0,229	0,030	0,097	-0,097	-0,388	-0,333	0,054	-0,002	-0,097	-0,074	-0,065	0,197
HA332318os	-0,818	0,346	142	-0,645	5,853	03.08.01	0,073	0,238	0,303	0,079	0,091	-0,007	0,114	-0,323	-0,196	-0,051	0,032	-0,114	-0,102	-0,108	0,165
HE201526od	-0,444	0,768	67	-0,060	4,059	30.08.01	-1,023	0,411	-0,558	0,653	-0,527	-0,181	0,006	-0,557	0,167	0,055	0,139	-0,046	0,028	0,025	0,226
HE201526os	-0,441	0,995	73	0,057	4,648	12.09.01	-0,362	1,049	-0,563	0,767	-0,817	-0,416	0,032	-0,064	-0,387	-0,073	-0,105	-0,235	-0,066	-0,082	0,237
HE357217od	-0,125	0,256	98	0,003	4,737	07.09.01	0,276	-0,051	0,061	0,714	-0,228	-0,063	-0,056	-0,063	-0,005	0,058	-0,029	-0,030	0,036	0,017	0,053
HE357217os	-0,182	0,221	101	-0,071	4,704	07.09.01	0,323	-0,111	0,084	0,642	-0,203	0,017	0,085	-0,035	-0,057	-0,036	0,000	-0,033	-0,041	-0,005	0,050
HE478927od	-0,708	0,239	27	-0,588	4,220	10.07.01	1,084	-0,158	-0,197	0,135	0,132	-0,139	0,256	0,297	-0,292	0,019	0,046	-0,022	0,112	0,031	0,189
HE744676od	-11,692	4,588	95	-9,398	4,124	20.09.01	3,435	-1,632	0,730	-8,505	-4,528	0,612	0,076	0,367	-0,192	-0,042	0,094	0,560	0,664	0,141	0,426
HE744676os	-1,221	0,381	97	-1,031	6,409	20.09.01	0,545	0,066	0,097	-0,299	-0,367	0,043	0,211	-0,040	0,043	-0,016	0,001	0,056	0,072	0,048	0,092

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>x</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>3</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>1</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>3</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>4</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>2</sup> in µm	Z <sub>x</sub> <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
HI423082od	0,711	0,727	4	1,075	5,211	10.07.01	-0,086	0,567	-0,100	1,766	0,713	0,019	0,265	-0,218	-0,139	0,006	-0,005	-0,114	0,038	0,014	0,144
HI423082os	0,693	0,722	178	1,054	5,031	10.07.01	-0,148	-0,697	0,057	1,745	0,720	0,000	-0,077	-0,077	-0,204	-0,075	-0,084	-0,128	-0,082	-0,022	0,112
HU623219od	-2,258	0,687	10	-1,914	4,378	28.08.01	0,542	-0,257	-0,237	-1,166	0,645	0,012	0,206	0,247	0,067	0,135	-0,043	-0,040	-0,110	0,034	0,139
HU894401od	-2,021	0,272	77	-1,884	5,189	12.07.01	0,409	-0,195	-0,107	-1,136	-0,243	0,011	-0,038	0,320	0,054	0,052	-0,014	-0,071	0,010	0,049	0,123
HU894401os	-2,459	0,804	109	-2,057	5,112	12.07.01	1,602	-0,213	0,486	-1,306	-0,636	-0,061	-0,061	0,229	0,012	0,035	0,016	-0,010	0,101	0,094	0,105
JE844003od	-0,621	0,611	175	-0,316	5,911	07.06.01	-0,269	-0,248	0,099	0,402	0,603	0,036	-0,070	-0,016	-0,015	-0,017	-0,025	-0,044	0,040	0,033	0,044
JE844003os	-0,587	0,608	175	-0,283	6,004	07.06.01	-0,116	-0,224	0,098	0,435	0,600	0,039	-0,010	0,059	0,095	0,005	0,024	-0,043	0,019	0,011	0,049
JU254589od	-4,155	0,334	60	-3,987	5,737	07.08.01	0,652	-0,271	-0,289	-3,199	-0,168	0,090	-0,001	-0,015	0,173	0,066	-0,047	-0,021	-0,042	-0,048	0,079
JU254589os	-3,719	0,158	122	-3,640	5,737	07.08.01	0,090	-0,465	0,131	-2,858	-0,044	-0,018	0,164	0,011	0,032	-0,030	-0,012	-0,030	-0,023	-0,052	0,067
JU257086od	-2,312	0,512	80	-2,056	5,398	12.07.01	1,664	-0,294	-0,174	-1,304	-0,482	0,157	0,079	-0,009	-0,142	-0,082	-0,066	-0,076	0,047	0,042	0,100
JU257086os	-3,540	1,675	88	-2,702	5,125	12.07.01	1,079	0,861	-0,096	-1,938	-1,672	0,016	-0,010	-0,077	-0,098	-0,083	0,031	0,032	0,119	0,046	0,071
KA377407od	-0,614	0,586	30	-0,321	6,291	10.07.01	1,087	-0,056	-0,502	0,397	0,300	-0,151	0,189	0,246	-0,151	0,008	0,009	-0,137	0,092	-0,019	0,151
KA377407os	-0,198	1,221	155	0,412	6,416	10.07.01	0,661	-0,924	0,944	1,116	0,774	0,082	-0,188	0,354	0,007	-0,032	-0,002	-0,141	0,029	-0,064	0,161
KA441033od	-1,289	0,523	59	-1,027	4,059	21.09.01	-0,130	-0,217	-0,457	-0,296	-0,253	-0,222	-0,039	-0,306	-0,031	-0,108	0,027	-0,208	0,032	0,020	0,170
KA441033os	-0,787	0,465	107	-0,555	5,417	21.09.01	0,547	0,204	0,258	0,168	-0,387	0,081	-0,115	0,043	0,020	0,082	-0,043	-0,211	0,018	-0,033	0,117
KI798099od	0,196	0,180	106	0,286	6,205	09.07.01	-0,049	-0,241	0,094	0,993	-0,151	0,041	-0,007	-0,180	-0,078	0,005	-0,013	-0,002	0,065	0,017	0,078
KI798099os	0,215	0,249	73	0,340	6,333	09.07.01	0,365	-0,276	-0,147	1,045	-0,196	-0,062	-0,067	-0,151	-0,026	0,007	0,004	0,001	0,073	0,041	0,069
KI943338od	-0,115	3,228	16	1,499	5,572	13.07.01	-0,525	0,652	-1,711	2,182	2,737	0,222	-0,052	0,308	-0,108	0,040	0,028	-0,292	0,028	-0,061	0,195
KI943338os	-0,593	4,657	124	1,735	4,838	13.07.01	3,906	-1,429	4,335	2,414	-1,703	-0,044	-0,178	0,363	-0,082	0,020	-0,015	-0,167	0,024	-0,003	0,170
KO217752od	1,110	0,616	127	1,418	5,056	20.07.01	-0,102	-0,496	0,590	2,102	-0,178	-0,044	-0,099	-0,167	-0,064	-0,016	0,053	-0,053	-0,062	0,019	0,086
KO217752os	0,589	0,839	63	1,008	4,460	20.07.01	0,076	0,720	-0,688	1,701	-0,477	0,095	0,055	-0,191	-0,086	-0,050	0,042	-0,091	-0,071	-0,003	0,107
KO605241od	1,123	0,679	174	1,463	5,129	12.10.01	0,002	-0,315	0,120	2,146	0,657	-0,200	0,118	0,281	-0,151	0,057	0,011	-0,220	0,036	0,011	0,178
KO605241os	-0,831	0,752	39	-0,455	4,265	12.10.01	-0,140	-0,543	-0,732	0,265	0,153	-0,200	0,076	-0,106	0,143	-0,065	0,055	-0,062	-0,062	-0,020	0,115
KR046873os	1,260	0,378	175	1,449	4,498	20.07.01	0,535	-0,381	0,066	2,133	0,372	-0,047	-0,272	0,028	-0,087	-0,002	0,043	-0,137	0,030	-0,023	0,123
KR069752od	-0,407	0,721	117	-0,046	4,943	26.07.01	-0,162	-0,943	0,579	0,666	-0,427	0,086	-0,068	-0,176	-0,159	-0,015	0,007	-0,015	0,011	-0,060	0,096
KR069752os	-0,411	0,335	55	-0,243	5,287	26.07.01	0,447	0,311	-0,313	0,473	-0,116	-0,108	0,059	-0,163	-0,160	0,030	-0,048	0,023	0,041	-0,040	0,098
KR323211od	0,833	0,530	31	1,098	4,969	26.07.01	-0,115	0,105	-0,473	1,789	0,226	0,163	-0,063	0,123	-0,179	0,055	0,019	-0,084	-0,007	0,001	0,124
KR323211os	0,297	1,291	165	0,942	4,444	26.07.01	0,054	-1,583	0,630	1,636	1,126	-0,200	-0,467	0,055	-0,050	-0,020	-0,090	-0,098	-0,103	-0,146	0,198
LI026591od	0,121	0,080	111	0,161	4,720	12.07.01	0,256	-0,190	0,019	0,870	0,015	-0,025	-0,067	-0,057	0,083	0,029	-0,021	-0,005	-0,020	-0,062	0,056
LI026591os	-0,175	0,223	99	-0,064	5,930	12.07.01	0,486	-0,602	0,068	0,649	-0,195	0,002	0,006	-0,025	-0,053	-0,001	-0,016	-0,037	-0,042	-0,093	0,080
LI225381od	0,366	0,170	112	0,451	6,090	09.07.01	0,482	-0,323	0,117	1,154	-0,121	0,041	0,068	0,066	-0,063	-0,017	-0,020	-0,175	-0,055	-0,054	0,099
LI619718od	-0,339	0,643	88	-0,017	6,086	23.07.01	0,324	0,053	-0,038	0,695	-0,641	-0,071	0,115	-0,082	-0,111	0,011	0,038	-0,069	-0,008	0,040	0,079
LI619718os	-0,833	1,093	85	-0,286	6,251	23.07.01	-0,207	-0,399	-0,195	0,431	-1,074	-0,040	-0,181	-0,160	-0,183	-0,049	0,022	-0,045	-0,022	0,046	0,113
ME239181od	0,203	0,803	175	0,605	4,252	31.08.01	1,090	0,513	0,075	1,305	0,687	0,054	-0,360	-0,155	0,168	-0,148	-0,168	-0,043	-0,019	0,040	0,189
ME473094od	-3,433	0,791	120	-3,038	4,399	13.07.01	-0,219	-0,529	0,684	-2,267	-0,398	0,111	0,056	-0,084	-0,108	-0,027	0,026	-0,055	-0,012	-0,004	0,076
MU095181od	-5,578	0,211	68	-5,472	5,605	10.07.01	0,456	-0,530	-0,142	-4,655	-0,156	0,011	-0,034	-0,059	-0,100	-0,007	-0,018	0,031	0,012	0,040	0,052
MU095181os	-5,225	0,249	73	-5,100	5,703	10.07.01	0,432	-0,524	-0,079	-4,290	-0,176	0,086	-0,036	-0,034	-0,082	-0,008	0,009	0,026	0,062	0,008	0,068
PA953782od	0,237	0,168	70	0,321	6,464	07.06.01	-0,308	-0,123	-0,098	1,026	-0,120	-0,073	-0,014	-0,319	-0,088	-0,087	-0,040	-0,068	-0,006	0,002	0,133
PA953782os	0,193	0,307	102	0,347	6,982	07.06.01	-0,050	0,454	0,114	1,052	-0,272	0,043	-0,104	-0,192	-0,159	-0,005	-0,017	-0,132	0,026	-0,059	0,118
PE522314od	-0,606	0,308	87	-0,452	5,760	06.08.01	0,512	-0,218	-0,030	0,268	-0,305	0,008	-0,027	-0,004	-0,056	-0,020	0,000	0,035	-0,043	-0,027	0,037
PE522314os	-0,453	0,395	69	-0,255	6,114	06.08.01	-0,010	0,140	-0,259	0,461	-0,293	0,040	0,045	-0,138	-0,141	0,020	-0,021	-0,001	-0,015	-0,039	0,077
PF945972od	-0,018	0,362	118	0,164	6,864	06.08.01	0,547	-0,682	0,297	0,872	-0,207	0,087	-0,265	0,242	0,185	0,043	0,016	-0,024	0,010	0,024	0,148
PF945972os	-0,308	0,747	69	0,066	6,444	06.08.01	0,216	0,164	-0,506	0,776	-0,545	-0,130	0,123	0,145	0,204	-0,070	-0,026	0,016	-0,008	0,043	0,115
PF947734od	0,115	0,161	112	0,196	5,059	06.08.01	0,139	-0,112	0,105	0,904	-0,116	0,169	-0,018	0,089	-0,243	0,076	0,043	-0,113	-0,019	-0,048	0,126
PF947734os	0,157	0,311	76	0,313	5,155	06.08.01	-0,255	-0,409	-0,039	1,019	-0,168	0,054	0,024	0,159	-0,223	-0,069	0,058	-0,102	-0,024	-0,028	0,135
PI499222os	-2,797	0,171	86	-2,712	4,489	11.09.01	-1,113	0,350	-0,030	-1,948	-0,164	-0,025	0,335	-0,497	-0,197	-0,053	-0,038	0,178	-0,172	-0,002	0,246
PO115925od	0,299	0,567	95	0,582	5,904	11.07.01	0,219	-0,591	0,096	1,283	-0,559	-0,037	0,114	0,030	-0,039	-0,065	-0,063	-0,031	0,092	0,042	0,071
PU656157od	-1,598	1,145	13	-1,026	4,333	05.09.01	-0,130	-0,115	-0,485	-0,294	1,036	-0,157	-0,201	0,052	0,198	0,150	-0,081	-0,256	-0,071	0,047	0,178
PU656157os	0,443	0,327	56	0,607	4,734	05.09.01	-0,522	1,181	-0,294	1,307	-0,136	0,158	-0,256	0,657	-0,012	-0,098	0,043	-0,306	-0,015	0,047	0,295
RE065709od	-10,606	2,258	114	-9,477	5,127	05.09.01	3,562	-0,163	1,704	-8,582	-1,475	0,129	0,076	0,809	-0,256	0,046	-0,096	0,178	0,246	0,035	0,348
RE065709os	-4,473	2,492	70	-3,227	4,582	05.09.01	-0,365	-0,154	-1,620	-2,453	-1,891	-0,559	-0,123	1,090	0,496	0,289	-0,113	0,227	0,717	-0,058	0,542

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>1</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>1</sub> <sup>+1</sup> in µm	Z <sub>2</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>2</sub> <sup>+2</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>+3</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>+1</sup> in µm	Z <sub>3</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-4</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>+2</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>+0</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>4</sub> <sup>-4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
RE623462od	-0,413	0,824	103	-0,001	5,408	24.07.01	-0,579	-2,044	0,348	0,711	-0,743	-0,332	0,114	-0,559	-0,613	0,139	-0,142	-0,149	0,079	0,009	0,340
RE623462os	-0,504	0,751	81	-0,129	4,797	24.07.01	0,035	0,392	-0,226	0,586	0,237	-0,348	0,123	-0,311	-0,360	0,095	0,177	-0,183	0,039	-0,017	0,266
RI250036od	-1,699	1,599	92	-0,899	5,903	31.07.01	1,080	-1,024	0,122	-0,170	-1,594	-0,043	0,000	-0,274	-0,202	-0,016	-0,013	-0,103	-0,067	-0,058	0,135
RI250036os	-1,682	2,369	96	-0,498	5,795	31.07.01	1,362	0,744	0,501	0,223	-2,315	0,063	-0,012	-0,040	-0,034	-0,037	0,018	-0,098	-0,039	-0,042	0,061
RO413222od	-0,220	0,428	7	-0,006	4,595	27.09.01	-0,198	0,147	-0,080	0,706	0,398	-0,099	0,152	-0,239	-0,439	-0,098	0,004	-0,167	-0,077	-0,083	0,210
RO413222os	-0,255	0,376	177	-0,067	4,428	27.09.01	0,182	-0,472	0,011	0,646	0,374	0,171	-0,254	-0,112	-0,189	0,067	0,073	-0,152	-0,150	-0,120	0,199
RO651419od	-6,804	2,347	110	-5,631	5,094	13.09.01	-0,327	-0,500	1,502	-4,810	-1,803	0,100	0,031	-0,372	-0,034	-0,004	-0,125	-0,221	-0,033	-0,012	0,176
RO651419os	-1,036	0,614	114	-0,729	5,413	13.09.01	-0,171	-0,116	0,464	-0,003	-0,401	-0,048	-0,035	-0,383	0,048	-0,063	0,109	0,035	0,029	0,007	0,148
RU267995od	-5,852	0,397	95	-5,653	4,974	07.06.01	0,277	-0,828	0,067	-4,832	-0,387	0,055	0,006	-0,261	-0,168	-0,048	-0,046	-0,039	-0,055	-0,106	0,135
RU267995os	-5,082	0,719	99	-4,722	5,537	07.06.01	0,296	-0,297	0,212	-3,919	-0,683	-0,038	-0,054	-0,072	-0,006	0,007	0,011	0,005	0,031	-0,013	0,042
SA004309od	2,039	0,343	171	2,211	4,410	12.07.01	0,744	0,109	0,098	2,880	0,323	-0,262	0,133	0,483	0,165	0,231	-0,172	-0,071	0,131	0,131	0,239
SC019341od	-0,771	0,728	23	-0,407	6,596	04.07.01	0,387	0,341	-0,520	0,312	0,506	-0,004	0,017	0,113	-0,106	0,033	0,039	0,001	0,007	0,047	0,065
SC019341os	-0,786	0,469	153	-0,552	6,745	04.07.01	0,211	-0,321	0,354	0,171	0,286	-0,020	-0,100	0,117	-0,080	-0,003	-0,001	-0,008	-0,051	0,043	0,073
SC083847od	1,212	0,572	69	1,498	4,648	05.07.01	1,824	-1,883	-0,381	2,181	-0,427	-0,116	-0,258	0,405	-0,335	-0,129	0,043	-0,032	0,214	-0,037	0,229
SC083847os	-3,328	0,646	17	-3,005	4,589	05.07.01	-0,576	-0,013	-0,364	-2,235	0,533	-0,263	0,035	-0,302	-0,087	-0,006	-0,047	-0,218	-0,085	-0,073	0,187
SC280880od	0,670	0,431	94	0,885	5,106	31.08.01	0,778	-0,372	0,044	1,580	-0,419	-0,083	0,124	-0,111	-0,039	-0,021	-0,031	-0,044	-0,008	-0,069	0,086
SC280880os	0,379	0,830	86	0,794	5,164	31.08.01	1,003	-0,109	-0,105	1,491	-0,823	0,213	-0,061	0,018	-0,109	-0,036	-0,050	-0,056	-0,027	-0,015	0,095
SC917856od	-1,681	1,434	8	-0,964	6,455	12.10.01	0,059	-0,882	-0,399	-0,234	1,376	0,043	-0,193	0,046	0,035	0,015	-0,026	-0,105	0,059	0,033	0,092
SC917856os	-1,862	1,297	162	-1,214	6,371	12.10.01	-0,129	-0,314	0,772	-0,479	1,042	0,018	0,145	-0,010	0,093	-0,001	0,050	-0,106	0,011	0,051	0,083
SE495728od	-1,089	0,469	167	-0,854	4,264	05.09.01	-0,220	-0,390	0,198	-0,126	0,423	0,183	-0,101	-0,314	-0,204	0,001	-0,021	-0,166	0,000	-0,027	0,171
SE495728os	-1,274	0,851	170	-0,848	4,939	05.09.01	-0,567	-0,151	0,295	-0,120	0,786	0,001	0,053	-0,248	-0,153	-0,010	-0,055	-0,158	-0,009	0,011	0,134
SP647235od	-1,518	0,922	13	-1,058	5,535	02.08.01	0,024	0,332	-0,369	-0,325	0,837	-0,064	0,199	-0,171	-0,271	0,021	0,041	-0,169	-0,034	0,044	0,159
SP647235os	-1,507	0,803	167	-1,105	5,419	02.08.01	0,591	-0,900	0,340	-0,372	0,711	-0,086	-0,178	0,013	-0,092	-0,026	0,020	-0,162	-0,036	-0,039	0,118
SP671642os	0,132	0,118	26	0,191	4,241	12.10.01	-0,200	-0,186	-0,091	0,899	0,071	-0,128	0,107	-0,159	-0,327	-0,016	0,040	-0,103	0,027	0,030	0,153
ST274777od	1,717	0,100	106	1,768	4,345	05.07.01	0,712	-0,419	0,055	2,445	-0,083	-0,160	-0,200	0,140	-0,078	0,062	-0,013	-0,108	0,002	0,001	0,121
ST274777os	1,560	0,093	93	1,606	4,540	05.07.01	0,420	0,020	-0,082	2,287	-0,004	0,007	0,052	0,014	-0,309	0,042	-0,025	-0,102	0,004	-0,015	0,123
ST314289od	-4,140	0,670	6	-3,805	5,262	13.07.01	0,331	0,081	-0,146	-3,019	0,654	-0,074	-0,044	-0,094	-0,086	0,059	-0,036	0,039	0,043	-0,010	0,067
ST314289os	-3,627	0,782	178	-3,235	4,871	13.07.01	-0,368	-0,358	0,055	-2,461	0,780	0,008	0,047	-0,190	-0,138	-0,044	0,012	0,035	0,005	-0,003	0,091
ST316587od	-8,888	2,089	96	-7,843	5,433	09.07.01	0,545	-1,121	0,424	-6,980	-2,043	-0,271	-0,154	0,291	0,347	-0,286	-0,093	-0,164	-0,206	-0,387	0,294
ST316587os	-9,853	2,081	80	-8,813	4,647	09.07.01	1,541	0,430	-0,630	-7,931	-1,960	0,462	-0,018	0,080	0,213	-0,166	0,123	0,039	-0,255	-0,139	0,274
ST478523od	1,431	1,103	178	1,983	4,899	04.07.01	2,278	-1,333	0,089	2,656	1,099	-0,175	-0,242	-0,180	0,067	-0,058	0,011	-0,043	0,089	-0,101	0,139
ST478523os	1,857	0,854	8	2,284	4,664	04.07.01	0,693	-0,037	-0,221	2,951	0,822	0,242	0,144	-0,120	-0,346	0,031	-0,091	-0,098	-0,045	0,196	0,186
ST630910od	-0,890	0,638	20	-0,571	5,664	31.07.01	0,263	-0,261	-0,402	0,152	0,495	0,020	-0,048	-0,179	-0,123	-0,031	-0,023	-0,011	-0,055	0,031	0,085
ST630910os	-1,204	0,709	162	-0,850	5,840	31.07.01	0,289	-0,356	0,405	-0,122	0,582	-0,101	0,021	-0,154	-0,030	0,011	0,045	-0,029	-0,025	0,017	0,073
TA517591od	2,341	0,606	157	2,644	5,350	24.07.01	0,349	-0,455	0,431	3,305	0,424	-0,042	-0,214	0,435	0,035	-0,102	-0,004	-0,213	-0,037	0,075	0,207
TA517591os	2,438	0,507	20	2,691	4,378	24.07.01	0,193	-0,378	-0,329	3,351	0,385	-0,031	-0,240	0,440	0,024	0,053	0,112	-0,147	-0,046	0,059	0,196
TR345212od	-0,780	0,827	85	-0,367	5,235	23.07.01	0,026	-0,960	-0,151	0,352	-0,811	0,105	-0,058	-0,232	-0,176	-0,005	0,033	0,008	0,072	-0,030	0,122
VA276733od	0,401	0,992	178	0,897	4,518	10.07.01	-0,018	-0,253	0,082	1,591	0,988	0,047	0,110	-0,047	0,026	0,002	-0,012	-0,184	-0,075	-0,040	0,100
VA276733os	0,238	0,660	15	0,568	4,602	10.07.01	-0,158	-0,233	-0,345	1,269	0,561	-0,250	-0,216	0,197	-0,135	-0,072	0,014	-0,183	-0,106	0,053	0,174
VO323688od	-1,578	1,153	119	-1,002	5,459	17.09.01	-0,602	0,173	0,043	-0,271	1,151	0,299	-0,046	-0,310	-0,337	0,035	0,024	0,160	-0,049	-0,055	0,210
VO323688os	-1,598	0,651	11	-1,273	4,864	17.09.01	-0,775	-0,559	-0,222	-0,536	0,598	-0,073	-0,235	-0,488	-0,410	0,035	-0,010	-0,029	-0,110	-0,081	0,247
VO328285od	0,023	0,465	80	0,255	5,924	20.07.01	0,342	-1,012	-0,159	0,962	-0,434	-0,017	0,050	-0,102	-0,288	-0,017	-0,001	-0,089	0,044	0,020	0,119
VO328285os	-0,032	0,682	86	0,309	6,153	20.07.01	0,363	0,536	-0,095	1,015	-0,675	0,069	-0,080	-0,223	-0,283	-0,038	0,011	-0,069	0,049	0,079	0,141
VO660698od	-1,930	0,720	93	-1,571	5,940	04.07.01	0,720	-0,763	0,083	-0,829	-0,711	-0,115	-0,042	0,134	0,002	-0,098	-0,056	0,029	-0,029	-0,019	0,082
VO660698os	-3,129	1,022	75	-2,618	6,465	04.07.01	0,834	0,722	-0,502	-1,856	-0,885	0,084	0,128	0,263	0,209	-0,048	0,021	-0,021	-0,067	-0,055	0,140
WE161335od	-0,580	0,677	102	-0,241	5,096	10.07.01	0,379	-0,059	0,278	0,475	-0,617	0,097	-0,032	-0,030	0,136	0,038	-0,024	-0,108	-0,038	-0,030	0,082
WE161335os	-0,956	0,890	95	-0,511	5,134	10.07.01	1,236	0,282	0,134	0,211	-0,875	-0,036	-0,175	0,144	0,027	-0,007	-0,040	-0,080	-0,009	0,043	0,094
WE352371od	-6,836	0,254	171	-6,709	6,708	19.07.01	0,395	-0,669	0,074	-5,868	0,235	-0,013	-0,190	-0,042	-0,100	0,009	-0,043	0,000	0,017	0,003	0,085
WE352371os	-7,672	0,090	37	-7,627	6,438	19.07.01	0,333	-0,135	-0,047	-6,768	0,044	0,078	-0,026	-0,070	-0,142	0,118	-0,031	0,031	-0,002	-0,017	0,079
WE586723od	0,896	0,444	93	1,118	6,829	17.09.01	0,474	-0,417	0,042	1,808	-0,441	0,049	-0,047	-0,095	0,100	-0,068	0,006	-0,088	0,102	0,049	0,081
WE586723os	0,775	0,775	83	1,162	6,886	17.09.01	0,397	0,299	-0,193	1,852	-0,751	0,000	-0,107	-0,253	0,147	0,046	0,049	-0,053	0,072	0,001	0,120

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Zr <sup>-1</sup> in µm	Zr <sup>1</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>0</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>-3</sup> in µm	Zs <sup>-1</sup> in µm	Zs <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>3</sup> in µm	Zr <sup>4</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>0</sup> in µm	Zr <sup>2</sup> in µm	Zr <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
WE588589od	-1,590	3,278	173	0,050	5,968	04.09.01	0,506	-1,517	0,740	0,760	3,193	-0,242	-0,277	0,528	-0,853	0,119	-0,016	-0,133	-0,373	0,031	0,403
WE660780od	-0,280	0,434	9	-0,063	5,955	17.09.01	-0,382	-0,314	-0,135	0,650	0,403	-0,103	0,033	0,442	-0,089	-0,108	-0,036	-0,165	0,054	-0,052	0,190
WE660780os	-0,263	0,298	146	-0,114	5,467	17.09.01	-0,169	-0,205	0,253	0,600	0,122	-0,026	0,049	0,308	-0,065	0,031	0,004	-0,216	-0,025	0,000	0,154
WI336850od	0,342	0,315	11	0,499	4,562	13.07.01	-0,099	0,225	-0,117	1,201	0,292	0,288	-0,028	-0,158	-0,112	0,148	0,019	-0,169	0,023	-0,154	0,166
WI336850os	-0,123	0,738	104	0,246	4,554	13.07.01	0,232	0,083	0,334	0,953	-0,656	-0,260	-0,070	-0,271	-0,122	0,013	-0,029	-0,034	0,086	0,071	0,149
WI617183os	-0,257	0,245	19	-0,135	5,258	19.07.01	1,298	0,010	-0,148	0,580	0,195	0,222	-0,093	0,293	0,011	-0,215	-0,053	-0,180	0,092	0,160	0,184
WO359744os	2,164	0,781	96	2,554	4,527	10.07.01	0,337	-0,434	0,157	3,217	-0,760	0,097	0,129	0,165	0,019	0,028	-0,030	-0,007	0,051	0,079	0,091
ZE761694od	1,217	0,569	174	1,502	4,872	07.08.01	0,139	0,294	0,126	2,184	0,553	-0,036	0,203	0,184	-0,217	0,006	-0,057	-0,169	-0,008	0,033	0,151
ZE761694os	1,361	0,621	7	1,672	5,112	07.08.01	0,587	-0,403	-0,152	2,351	0,601	0,218	-0,068	0,041	-0,156	0,039	0,009	-0,126	-0,023	0,075	0,120

## A.4. Ergebnisse der Wellenfrontanalyse bei Skalierung auf einen Pupillendurchmesser von 5 mm

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sup>-1</sup> in µm	Z <sup>1</sup> in µm	Z <sup>2</sup> in µm	Z <sup>0</sup> in µm	Z <sup>2</sup> in µm	Z <sup>3</sup> in µm	Z <sup>-1</sup> in µm	Z <sup>1</sup> in µm	Z <sup>3</sup> in µm	Z <sup>-4</sup> in µm	Z <sup>2</sup> in µm	Z <sup>0</sup> in µm	Z <sup>2</sup> in µm	Z <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
AD112007od	-2,959	0,838	172	-2,540	6,523	12.07.01	0,265	-1,097	0,366	-2,780	1,255	0,042	-0,332	0,271	0,081	0,077	-0,074	-0,054	0,047	0,076	0,166
AD112007os	-3,201	0,479	177	-2,962	6,495	12.07.01	0,467	-0,661	0,089	-3,426	0,741	-0,226	-0,060	0,506	-0,013	0,022	-0,015	-0,068	0,069	0,088	0,205
AN254478od	-2,213	1,227	86	-1,599	5,679	12.07.01	0,525	-1,201	-0,269	-1,338	-1,898	-0,159	-0,125	-0,320	-0,138	-0,098	-0,014	-0,019	0,172	0,145	0,166
AN254478os	-1,473	0,436	107	-1,255	5,347	12.07.01	0,586	-1,412	0,359	-0,811	-0,573	-0,115	-0,119	-0,276	-0,543	0,059	-0,024	0,026	0,130	0,055	0,233
AN284390od	0,413	0,836	14	0,831	5,707	31.08.01	1,113	0,354	-0,605	2,386	1,155	-0,017	0,107	0,308	-0,324	0,001	-0,006	-0,204	-0,081	-0,100	0,195
AN284390os	2,595	3,367	150	4,279	5,569	31.08.01	4,112	0,646	4,525	7,669	2,686	-0,313	-0,098	0,371	0,235	-0,069	-0,090	-0,301	-0,188	-0,179	0,264
BA032767od	-0,749	0,387	9	-0,555	5,040	12.07.01	-0,276	-0,040	-0,202	0,261	0,568	0,013	0,161	-0,250	-0,317	-0,086	-0,057	-0,126	0,079	-0,037	0,179
BA186031od	1,923	0,127	50	1,986	5,935	10.07.01	0,458	0,361	-0,195	4,156	-0,035	-0,212	0,324	-0,096	-0,406	0,147	0,095	-0,383	0,031	0,057	0,271
BA186031os	1,417	0,425	152	1,630	5,952	10.07.01	0,850	-0,605	0,551	3,610	0,369	-0,061	-0,096	0,244	-0,202	0,001	-0,206	-0,320	0,089	-0,093	0,203
BA564995od	-9,475	0,432	95	-9,259	6,110	07.06.01	-1,745	-0,107	0,121	-13,076	-0,663	0,022	-0,096	-0,233	0,650	-0,066	-0,038	0,011	-0,369	-0,390	0,305
BA564995os	-9,121	0,471	88	-8,886	6,396	07.06.01	-0,625	0,415	-0,069	-12,504	-0,731	-0,034	0,260	-0,305	0,570	0,022	0,027	-0,042	-0,380	-0,380	0,303
BE139861od	-4,040	0,594	104	-3,743	5,879	10.07.01	0,248	-0,486	0,438	-4,623	-0,797	-0,163	0,244	-0,535	0,271	0,015	-0,085	0,118	-0,294	-0,095	0,267
BE139861os	-2,851	0,706	81	-2,498	5,427	10.07.01	0,116	-0,698	-0,360	-2,716	-1,027	0,094	-0,103	-0,750	0,152	-0,099	0,042	0,167	-0,182	-0,123	0,303
BE529561od	0,100	0,168	143	0,184	6,326	30.07.01	0,634	-0,742	0,245	1,395	0,077	0,026	-0,150	-0,255	-0,428	0,094	0,035	-0,196	0,028	-0,002	0,211
BE529561os	-0,242	0,085	103	-0,199	5,982	30.07.01	1,324	-0,232	0,060	0,807	-0,117	-0,193	0,138	0,067	-0,402	0,010	0,059	-0,112	0,148	-0,001	0,184
BU732171os	-3,997	0,742	180	-3,626	5,214	28.08.01	-0,760	-0,743	0,004	-4,445	1,159	0,270	-1,011	0,849	0,997	0,262	0,156	-0,104	0,271	-0,098	0,615
CA227646od	0,150	0,121	158	0,210	6,353	09.07.01	0,418	-1,039	0,128	1,434	0,130	0,079	-0,326	0,258	0,137	0,138	0,159	0,003	-0,248	-0,099	0,192
DA226649od	-7,795	0,399	122	-7,595	6,625	19.09.01	0,778	-0,317	0,534	-10,526	-0,304	-0,106	-0,228	0,371	-0,152	0,067	-0,028	-0,217	0,024	-0,035	0,202
DA226649os	-8,744	0,889	78	-8,299	5,915	19.09.01	1,974	-0,019	-0,558	-11,605	-1,270	-0,366	-0,205	0,408	-0,432	-0,062	-0,131	-0,315	-0,112	-0,193	0,317
DO830916od	-4,677	0,701	105	-4,327	5,092	21.09.01	0,148	-1,584	0,542	-5,518	-0,952	-0,055	0,001	0,135	-0,246	0,189	0,090	-0,172	-0,029	-0,123	0,153
DO830916os	-4,331	0,623	82	-4,019	5,298	21.09.01	0,915	-0,772	-0,269	-5,046	-0,936	0,010	-0,041	0,396	0,035	-0,036	0,025	-0,142	0,042	0,048	0,157
FU997989od	-1,366	0,093	159	-1,320	5,373	09.07.01	1,254	-0,726	0,097	-0,910	0,105	0,237	-0,263	0,172	0,102	-0,029	0,080	0,041	0,044	-0,025	0,149
GO204868od	-2,936	0,367	52	-2,752	5,337	21.09.01	0,495	-1,876	-0,554	-3,105	-0,147	-0,400	0,656	-0,677	0,835	-0,091	-0,096	-0,314	-0,118	-0,077	0,492
GR915594od	-3,505	0,119	92	-3,446	6,215	24.09.01	-0,200	-0,225	0,031	-4,168	0,027	-0,085	-0,002	-0,360	-0,198	0,133	-0,029	-0,234	-0,006	-0,019	0,191
GR915594os	-4,173	0,326	125	-4,010	5,900	24.09.01	0,583	-0,908	0,464	-5,032	-0,189	0,015	0,071	-0,251	-0,241	-0,019	-0,002	-0,199	0,015	0,048	0,160
HA332318od	-0,671	0,107	77	-0,618	6,381	03.08.01	-1,237	-0,342	-0,082	0,165	-0,124	0,151	-0,258	-0,503	-0,500	0,047	0,109	-0,131	-0,133	-0,109	0,288
HA332318os	-0,962	0,322	131	-0,802	5,853	03.08.01	-0,321	0,447	0,471	-0,116	-0,079	0,056	0,229	-0,483	-0,346	-0,143	-0,005	-0,165	-0,226	-0,197	0,269
HE357217od	-0,147	0,189	101	-0,052	5,061	07.09.01	0,448	-0,200	0,089	1,032	-0,236	-0,180	-0,088	-0,225	0,015	0,103	0,000	-0,091	0,058	0,020	0,126
HE357217os	-0,205	0,288	99	-0,061	5,272	07.09.01	0,444	-0,007	0,126	1,018	-0,423	0,088	0,222	-0,041	-0,014	-0,043	0,000	-0,074	-0,074	-0,043	0,100
HE744676os	-1,025	0,248	100	-0,901	6,409	20.09.01	0,517	0,398	0,131	-0,268	-0,364	0,124	0,457	-0,286	0,091	-0,037	-0,020	0,229	0,162	0,078	0,235
HI423082od	0,578	0,684	3	0,920	5,211	10.07.01	-0,364	0,934	-0,109	2,522	1,053	0,010	0,177	-0,357	-0,321	0,075	0,029	-0,179	-0,067	-0,030	0,204
HI423082os	0,594	0,598	3	0,893	5,073	10.07.01	-0,278	-0,884	-0,099	2,481	0,929	0,017	-0,017	-0,045	-0,283	-0,129	-0,110	-0,214	-0,149	-0,126	0,162
HU894401od	-2,230	0,268	68	-2,096	5,311	12.07.01	1,058	-0,226	-0,293	-2,100	-0,289	0,071	0,009	0,514	0,150	0,035	-0,074	-0,068	0,177	0,056	0,206

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Zr <sup>1</sup> in µm	Zr <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>0</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>3</sup> in µm	Zs <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>1</sup> in µm	Zs <sup>3</sup> in µm	Zs <sup>4</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>0</sup> in µm	Zs <sup>2</sup> in µm	Zs <sup>4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
HU894401os	-2,435	0,697	113	-2,087	5,112	12.07.01	2,249	-0,375	0,784	-2,085	-0,753	-0,154	-0,179	0,300	-0,067	0,094	0,059	-0,028	0,263	0,049	0,178
JE844003od	-0,698	0,654	177	-0,370	5,911	07.06.01	-0,355	-0,386	0,092	0,545	1,018	0,051	-0,100	-0,009	-0,003	-0,019	-0,046	-0,053	0,060	0,034	0,060
JE844003os	-0,663	0,646	174	-0,340	6,004	07.06.01	-0,096	-0,339	0,223	0,592	0,984	0,052	-0,065	0,090	0,128	0,015	0,060	-0,047	0,039	0,011	0,072
JU254589od	-4,262	0,384	62	-4,070	5,737	07.08.01	0,836	-0,356	-0,496	-5,124	-0,336	0,086	0,029	0,048	0,323	0,140	-0,006	-0,167	-0,017	-0,102	0,156
JU254589os	-3,797	0,145	119	-3,725	5,737	07.08.01	0,184	-0,347	0,170	-4,595	-0,093	-0,040	0,345	0,171	0,090	-0,044	-0,027	-0,164	-0,003	-0,049	0,162
JU257086od	-2,511	0,578	80	-2,222	5,757	12.07.01	1,637	-0,439	-0,319	-2,292	-0,842	0,159	0,024	0,005	-0,129	-0,064	-0,087	-0,118	0,056	0,045	0,105
JU257086os	-3,110	1,408	89	-2,406	6,125	26.09.01	0,192	1,093	-0,085	-2,574	-2,198	-0,097	0,136	-0,202	-0,196	-0,018	0,023	-0,052	0,159	0,031	0,131
KA377407od	-0,880	0,646	23	-0,557	6,291	10.07.01	1,647	0,173	-0,727	0,259	-0,342	0,264	0,383	-0,286	0,039	0,043	-0,317	0,236	-0,024	0,280	
KA377407os	-0,448	1,257	155	0,180	6,416	10.07.01	1,281	-1,420	1,487	1,389	1,282	0,217	-0,322	0,572	-0,059	-0,078	0,028	-0,316	0,090	-0,081	0,288
KA441033os	-1,128	0,420	106	-0,918	5,417	21.09.01	0,752	0,074	0,341	-0,294	-0,559	0,100	-0,173	0,129	-0,045	0,050	-0,022	-0,511	-0,020	0,072	0,248
KI798099od	0,195	0,117	121	0,253	6,205	09.07.01	-0,335	-0,305	0,155	1,500	-0,091	0,056	-0,030	-0,344	-0,093	-0,021	-0,026	-0,057	0,094	0,001	0,139
KI798099os	0,257	0,195	58	0,355	6,334	09.07.01	0,119	-0,444	-0,264	1,656	-0,127	-0,103	-0,081	-0,327	-0,101	-0,016	-0,028	-0,059	0,078	0,042	0,140
KI943338od	-0,599	3,256	16	1,028	5,572	13.07.01	-0,216	0,686	-2,682	2,688	4,322	0,464	-0,213	0,622	-0,156	0,063	-0,010	-0,618	0,062	-0,102	0,403
KO217752od	0,965	0,727	123	1,328	5,141	20.07.01	-0,427	-0,725	1,041	3,148	-0,452	-0,025	-0,173	-0,236	-0,061	0,014	0,049	-0,162	-0,215	0,067	0,150
KO605241od	0,754	0,711	176	1,110	5,129	12.10.01	0,503	-0,245	0,167	2,812	1,082	-0,429	0,064	0,895	-0,157	0,149	0,043	-0,468	-0,070	-0,046	0,422
KR069752os	-0,389	0,373	49	-0,202	5,287	26.07.01	0,249	0,480	-0,575	0,802	-0,088	-0,150	0,251	-0,438	-0,384	-0,012	-0,024	0,063	0,071	-0,038	0,234
LI026591od	-0,174	0,108	60	-0,120	5,941	12.07.01	0,575	-0,146	-0,042	0,928	-0,101	-0,010	-0,088	-0,013	0,219	0,040	0,045	-0,023	0,038	-0,129	0,109
LI026591os	-0,219	0,211	92	-0,114	5,930	12.07.01	0,632	-0,804	0,035	0,938	-0,318	-0,022	-0,042	0,084	-0,087	-0,007	-0,039	-0,066	-0,011	-0,128	0,123
LI225381od	0,160	0,187	103	0,253	6,090	09.07.01	0,618	-0,277	0,123	1,500	-0,260	0,026	0,248	-0,017	-0,165	-0,081	-0,068	-0,157	0,018	0,031	0,134
LI619718od	-0,457	0,664	91	-0,125	6,086	23.07.01	0,272	0,204	0,036	0,921	-1,036	-0,116	0,163	-0,150	-0,263	0,071	0,105	-0,139	-0,010	0,106	0,153
LI619718os	-0,921	1,125	85	-0,359	6,251	23.07.01	-0,452	-0,731	-0,304	0,563	-1,730	-0,043	-0,314	-0,256	-0,387	-0,109	-0,023	-0,101	-0,027	0,077	0,209
MU095181od	-4,860	0,190	48	-4,765	6,700	23.07.01	-0,471	0,288	-0,294	-6,189	-0,033	-0,008	-0,212	-0,279	-0,137	-0,010	-0,013	0,038	0,006	0,017	0,136
MU095181os	-4,900	0,166	123	-4,817	6,685	23.07.01	-0,244	-0,262	0,206	-6,269	-0,109	0,087	0,159	-0,154	-0,182	-0,047	0,018	0,072	0,060	-0,055	0,119
PA953782od	0,115	0,225	69	0,228	6,464	07.06.01	-0,751	-0,230	-0,223	1,461	-0,252	-0,173	-0,161	-0,432	-0,120	-0,050	-0,041	-0,123	-0,036	-0,008	0,196
PA953782os	-0,013	0,317	100	0,146	6,982	07.06.01	-0,288	0,450	0,158	1,336	-0,461	0,098	-0,064	-0,277	-0,225	-0,022	-0,017	-0,256	-0,066	-0,048	0,182
PE522314od	-0,641	0,400	88	-0,440	5,760	06.08.01	0,682	-0,279	-0,044	0,437	-0,623	-0,042	-0,012	0,092	0,060	-0,024	0,022	-0,022	-0,105	-0,060	0,061
PE522314os	-0,477	0,423	69	-0,265	6,114	06.08.01	-0,172	0,213	-0,436	0,706	-0,493	0,090	0,070	-0,148	-0,249	0,031	-0,052	-0,032	-0,040	-0,022	0,115
PF945972od	-0,055	0,377	119	0,134	6,864	06.08.01	1,042	-1,237	0,497	1,317	-0,313	0,099	-0,543	0,504	0,077	0,007	-0,039	-0,007	0,021	0,307	
PF945972os	-0,316	0,797	69	0,082	6,444	06.08.01	0,480	0,391	-0,840	1,239	-0,918	-0,206	0,352	0,310	0,403	-0,144	-0,015	0,015	-0,080	0,016	0,239
PF947734od	-0,094	0,214	108	0,013	5,096	06.08.01	0,395	-0,289	0,190	1,132	-0,267	0,166	-0,081	0,183	-0,348	0,177	0,017	-0,260	-0,024	-0,098	0,205
PF947734os	-0,031	0,327	65	0,133	5,155	06.08.01	-0,085	-0,470	0,003	1,316	-0,377	0,154	0,053	0,326	-0,328	-0,290	0,007	-0,248	-0,109	-0,121	0,262
PO115925od	0,375	0,412	95	0,581	5,904	11.07.01	0,178	-0,556	0,112	2,002	-0,634	-0,174	0,238	-0,191	-0,157	-0,070	0,008	0,044	0,115	-0,008	0,150
RE065709od	-10,171	1,970	116	-9,186	5,127	05.09.01	5,415	-0,216	2,444	-12,963	-1,870	0,047	-0,072	1,213	-0,163	-0,026	-0,191	0,454	0,337	0,042	0,533
RE623462od	-0,625	0,693	97	-0,278	5,408	24.07.01	-1,452	-2,351	0,287	0,686	-1,042	-0,204	0,242	-0,950	-0,730	0,264	-0,108	-0,407	0,072	-0,161	0,491
RI250036od	-1,807	1,693	92	-0,961	5,903	31.07.01	1,001	-1,331	0,191	-0,360	-2,638	-0,033	-0,107	-0,506	-0,354	0,000	-0,006	-0,215	-0,073	-0,048	0,247
RI250036os	-1,862	2,425	96	-0,649	5,795	31.07.01	1,673	0,909	0,802	0,118	-3,704	0,087	0,004	-0,130	-0,075	-0,074	0,039	-0,194	-0,017	-0,053	0,113
RO651419od	-7,124	2,332	108	-5,958	5,158	13.09.01	-0,864	-0,734	2,139	-8,018	-2,948	0,111	0,147	-0,523	0,038	0,078	-0,100	-0,389	-0,170	-0,124	0,275
RO651419os	-1,012	0,712	116	-0,656	5,413	13.09.01	-0,759	-0,161	0,878	0,107	-0,679	-0,201	-0,085	-0,833	0,093	-0,069	0,037	0,152	-0,127	-0,070	0,326
RU267995os	-5,062	0,681	100	-4,721	5,537	07.06.01	0,279	-0,464	0,367	-6,122	-0,992	-0,071	-0,082	-0,045	0,090	-0,004	0,038	0,011	0,101	-0,018	0,071
SC019341od	-0,789	0,698	22	-0,440	6,596	04.07.01	0,626	0,430	-0,748	0,437	0,792	0,038	0,007	0,163	-0,131	0,024	0,037	-0,067	-0,001	0,067	0,090
SC019341os	-0,803	0,417	152	-0,594	6,745	04.07.01	0,421	-0,545	0,524	0,201	0,366	0,021	-0,208	0,227	-0,100	-0,042	-0,028	-0,096	-0,044	-0,015	0,129
SC280880od	0,400	0,362	94	0,581	5,233	21.09.01	-0,083	-0,157	0,072	2,002	-0,554	-0,256	0,194	-0,189	-0,081	0,026	-0,002	-0,094	-0,068	-0,125	0,150
SC280880os	0,085	0,812	87	0,491	5,523	21.09.01	0,651	-0,158	-0,141	1,864	-1,260	0,432	-0,153	0,010	-0,127	-0,111	-0,043	-0,126	-0,046	-0,141	0,190
SC917856od	-1,889	1,516	8	-1,131	6,455	12.10.01	0,104	-1,337	-0,686	-0,621	2,267	0,049	-0,244	0,073	0,090	0,024	-0,018	-0,217	0,059	0,032	0,144
SC917856os	-2,043	1,339	161	-1,373	6,371	12.10.01	-0,167	-0,216	1,286	-0,992	1,649	0,073	0,250	0,031	0,153	-0,071	0,070	-0,210	-0,021	0,117	0,152
SE495728od	-1,228	0,548	171	-0,954	6,290	05.09.01	-0,716	-0,285	0,270	-0,349	0,805	0,079	0,173	-0,691	-0,528	0,050	-0,039	-0,325	0,097	-0,029	0,351
SE495728os	-1,370	0,843	169	-0,949	6,504	05.09.01	-0,623	-0,495	0,480	-0,342	1,218	-0,033	-0,274	-0,308	-0,272	-0,050	-0,135	-0,232	-0,039	-0,134	0,223
SP647235od	-1,708	0,830	11	-1,293	5,535	02.08.01	-0,239	0,618	-0,469	-0,869	1,206	-0,058	0,208	-0,422	-0,385	0,043	0,075	-0,269	-0,079	0,007	0,253
SP647235os	-1,717	0,745	165	-1,344	5,419	02.08.01	0,703	-1,339	0,567	-0,948	1,000	-0,150	-0,241	-0,133	-0,140	0,003	0,056	-0,279	-0,084	-0,062	0,185
ST314289od	-4,187	0,652	16	-3,861	6,237	21.09.01	0,536	-0,655	-0,529	-4,804	0,871	0,090	-0,109	-0,089	-0,036	0,165	0,025	0,125	0,040	-0,052	0,108
ST314289os	-3,804	0,545	178	-3,532	5,768	21.09.01	-0,485	-0,252	0,053	-4,300	0,849	-0,066	-0,101	-0,304	-0,101	-0,048	0,036	0,070	0,077	-0,050	0,130

ID	Sphäre	Zylinder	Achse	sphär. Äquivalent	d in mm	Datum	Z <sub>r</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>r</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-1</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-3</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-4</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>0</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-2</sup> in µm	Z <sub>s</sub> <sup>-4</sup> in µm	RMS-Wert in µm
ST316587od	-9,098	2,117	93	-8,040	5,433	09.07.01	0,865	-1,568	0,394	-11,208	-3,284	-0,596	-0,209	-0,324	0,149	-0,378	-0,241	-0,180	0,143	-0,367	0,350
ST630910od	-0,922	0,635	22	-0,604	5,664	31.07.01	0,098	-0,348	-0,690	0,186	0,712	0,083	-0,035	-0,336	-0,194	-0,039	-0,048	-0,064	-0,086	0,033	0,150
ST630910os	-1,270	0,721	160	-0,909	5,840	31.07.01	0,201	-0,447	0,718	-0,281	0,867	-0,138	-0,046	-0,188	-0,136	-0,066	0,065	-0,085	-0,005	0,032	0,112
TA517591od	1,978	0,544	157	2,250	5,350	24.07.01	1,010	-0,917	0,611	4,559	0,588	-0,270	-0,484	0,770	-0,088	-0,182	-0,095	-0,572	-0,086	0,204	0,439
TR345212od	-0,674	0,726	87	-0,311	5,353	23.07.01	-0,182	-1,456	-0,135	0,636	-1,126	-0,024	-0,175	-0,355	-0,317	-0,004	-0,004	0,030	0,157	-0,010	0,188
VO323688od	-1,347	1,081	178	-0,807	5,459	17.09.01	-1,209	0,166	0,146	-0,125	1,681	0,393	-0,008	-0,733	-0,386	0,131	0,066	0,164	-0,114	0,013	0,339
VO328285od	-0,060	0,394	78	0,137	5,924	20.07.01	0,285	-1,186	-0,244	1,323	-0,560	0,018	0,122	-0,174	-0,494	0,025	-0,006	-0,152	0,098	0,041	0,206
VO328285os	-0,097	0,600	86	0,202	6,153	20.07.01	0,165	0,519	-0,120	1,422	-0,929	0,089	-0,207	-0,338	-0,508	-0,066	0,037	-0,145	0,112	0,142	0,247
VO660698od	-1,950	0,770	91	-1,565	5,940	04.07.01	1,174	-1,006	0,052	-1,285	-1,199	-0,319	-0,092	0,474	0,092	-0,081	-0,048	-0,021	-0,088	-0,073	0,216
VO660698os	-3,196	1,067	77	-2,663	6,465	04.07.01	1,470	1,091	-0,746	-2,968	-1,488	0,336	0,197	0,634	0,505	-0,109	0,036	-0,073	-0,074	-0,155	0,330
WE161335od	-0,796	0,716	99	-0,438	5,096	10.07.01	0,456	-0,085	0,349	0,441	-1,062	0,178	0,009	0,031	0,338	-0,005	-0,085	-0,276	-0,061	-0,130	0,192
WE161335os	-1,099	0,885	93	-0,656	5,134	10.07.01	1,763	0,100	0,131	0,106	-1,371	-0,045	-0,368	0,342	0,132	0,011	-0,053	-0,202	0,056	-0,001	0,209
WE352371od	-6,927	0,293	178	-6,781	5,953	19.07.01	0,028	-0,735	0,024	-9,278	0,454	-0,082	-0,225	-0,028	-0,183	0,000	-0,049	0,096	0,145	0,062	0,132
WE352371os	-7,484	0,080	51	-7,444	6,273	19.07.01	0,816	-0,423	-0,103	-10,295	0,004	0,097	-0,078	-0,082	-0,233	0,110	-0,038	0,048	-0,023	0,001	0,110
WE586723od	0,807	0,295	93	0,954	6,829	17.09.01	0,438	-0,606	0,052	2,574	-0,457	0,166	-0,095	-0,312	0,182	-0,165	-0,030	-0,218	0,216	0,086	0,198
WE586723os	0,715	0,633	83	1,031	6,886	17.09.01	0,159	0,288	-0,247	2,693	-0,957	-0,026	-0,077	-0,547	0,113	0,150	0,062	-0,194	0,221	0,003	0,235
WE588589od	-1,507	2,653	173	-0,180	5,968	04.09.01	1,493	-2,216	1,062	0,836	4,007	-0,404	-0,386	1,363	-1,062	0,125	-0,083	-0,281	-0,894	0,019	0,715
WE660780od	-0,566	0,415	13	-0,359	5,955	17.09.01	-0,013	-0,316	-0,260	0,562	0,584	-0,198	0,101	0,498	-0,219	-0,120	-0,003	-0,403	-0,111	-0,177	0,289
WE660780os	-0,573	0,269	137	-0,438	5,467	17.09.01	0,143	-0,207	0,377	0,440	0,056	0,064	0,082	0,456	-0,126	0,026	-0,050	-0,386	-0,116	-0,039	0,256
WI617183os	-0,622	0,378	13	-0,434	5,258	19.07.01	1,985	-0,247	-0,255	0,448	0,532	0,417	-0,115	0,600	-0,077	-0,307	-0,033	-0,426	0,147	0,105	0,345
ZE761694os	1,121	0,590	7	1,416	5,112	07.08.01	0,751	-0,597	-0,231	3,282	0,892	0,469	-0,101	0,020	-0,315	0,074	0,015	-0,377	-0,045	0,052	0,267

## A.5. Patienten-ID's der Augen in den einzelnen Vergleichsgruppen

gesund	gesund	Katarakt	alle IOL	normale IOL	MFL	Hornhaut	Netzhaut	AMD	Glaukom	Amblyopie
AD112007od	LU837792os	BA186031od	AM147946od	AM147946od	HE201526os	BE110672od	AM147946od	AM147946od	BA186031od	AL514111OD
AN284390od	MU095181od	BU350077od	BU732171os	BU732171os	KO605241os	BU350077os	BA186031od	BA186031od	DO830916os	AN284390os
AN755916os	MU634865os	BU732171od	EI214795os	EI214795os	ME239181os	BU732171os	EH709364os	EH709364os	EI214795os	BA211717od
AZ604038os	PA953782od	ED563187OS	FU708354OS	FU708354OS	PI499222od	Do721348od	EI214795os	FU708354od	KU051750od	CA227646OS
BA032767od	PE522314os	EH709364od	GE316385os	GE316385os	SC083847OS	HA574691os	FU708354od	GO204868od	MA587838os	KA377407os
BA211717os	PF945972od	EI214795od	GE426515od	GE426515od	SP671642os	HE744676od	GO204868od	GU926999os	ME473094od	PO115925os
BA540126OD	PF947734os	GE316385od	GO204868od	GO204868od		HO193563od	GU926999os	HE478927od	WI617183os	
BA564995os	PO115925od	GU926999os	GR480213os	GR480213os		KA373246OS	HE478927od	KR046873od		
BE139861od	RI250036od	HE478927od	HE192698od	HE192698od		KA504932od	HU623219od	ST415248os		
BE529561os	RO413222os	HI423082os	HE201526os	HO193563od		MA587838od	KO217752os	TH311582os		
BI607204od	SC019341OD	HO193563OS	HO193563od	KA373246OS		MU096042os	KR046873od	TH553416os		
BO496552os	SC280880os	HU623219od	KA373246OS	KA441033od		RE065709od	KR069752os	ZE761694od		
CA227646OD	SC917856od	KA373246OD	KA441033od	PU656157od		SA004309os	LA794914OD			
DA226649od	SE495728os	KA504932os	KO605241os	SA004309os		SC111608os	PU656157os			
EC290378OS	SP647235od	KA677881OD	ME239181os	SC110335os		ST316587OS	SC110335od			
FR808977od	ST274777OS	KO605241od	PI499222od	SC111608od		ST415248os	ST415248os			
FU997989os	ST314289od	KR046873os	PU656157od	ST415248os		VO323688od	TA517591os			
GR283990od	ST630910os	LA794914OD	SA004309os	TH553416os		WE588589os	TH311582os			
GR915594os	SZ782469od	ME239181od	SC083847OS				TH553416os			
GU845209od	VA276733os	PI499222os	SC110335os				WI617183od			
HA332318os	VO323688os	RE623462os	SC111608od				WO359744os			
HE357217od	VO328285od	RO651419od	SP671642os				WO680651OD			
HE744676os	VO660698os	SA004309od	ST415248os				ZE761694od			
HU894401os	WE161335od	SC083847OD	TH553416os							
JE844003od	WE352371os	ST270839OS								
JU254589os	WE588589od	ST415248od								
JU257086od		ST478523OD								
KA377407od		TA517591os								
KI798099OS		TH311582od								
KI943338od		WE586723os								
KR323211os		WI336850od								
LE186033od		WI617183os								
LI225381OD		WO680651OD								
LI619718os		ZE761694os								



## A.6. Patienten-ID's und BCVA der Augen in den Visusgruppen 1 und 2

ID	BCVA	Visusgruppe
AD112007od	1,25	1
AN284390od	1,25	1
AN755916os	1,2	1
BA032767od	1,25	1
BA211717os	1,25	1
BA540126OD	1,25	1
BE529561os	1,25	1
EC290378OS	1,25	1
FR808977od	1,2	1
FU997989os	1,25	1
GR283990od	1,25	1
GU845209od	1,2	1
HA332318os	1,25	1
HE357217od	1,25	1
HE744676os	1,25	1
JU257086od	1,25	1
KA377407od	1,25	1
KI798099OS	1,25	1
LE186033od	1,25	1
LI225381OD	1,25	1
LI619718os	1,25	1
MU095181od	1,6	1
MU634865os	1,2	1
PA953782od	1,25	1
PE522314os	1,25	1
PF945972od	1,25	1
PO115925od	1,25	1
SC019341OD	1,25	1
SC280880os	1,25	1
SC917856od	1,25	1
SE495728os	1,25	1
ST630910os	1,25	1
SZ782469od	1,25	1
VA276733os	1,25	1
VO323688os	1,25	1
VO328285od	1,6	1
VO660698os	1,25	1
WE161335od	1,25	1
WE352371os	1,25	1

ID	BCVA	Visusgruppe
AZ604038os	0,8	2
BE139861od	1	2
CA227646OD	0,8	2
DA226649od	0,9	2
GR915594os	1	2
HU894401os	0,8	2
JE844003od	1	2
JU254589os	1	2
KI943338od	1	2
KR323211os	1	2
PF947734os	1	2
RI250036od	1	2
RO413222os	1	2
SP647235od	1	2
ST274777OS	1	2
ST314289od	1	2
WE588589od	1	2